

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Žiga Stopinšek

**Segmentacija in rekonstrukcija
kulturne dediščine iz fotogrametrično
pridobljenega oblaka točk**

MAGISTRSKO DELO

ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE
RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKA

MENTOR: prof. dr. Franc Solina

Ljubljana, 2016

Rezultati magistrskega dela so intelektualna lastnina avtorja in Fakultete za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Za objavlanje ali izkoriščanje rezultatov magistrskega dela je potrebno pisno soglasje avtorja, Fakultete za računalništvo in informatiko ter mentorja.

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Francu Solini, ki me je skozi celotno delo usmerjal, bil vedno na voljo za diskusijo o temi in mi omogočil obisk poletne šole za 3D dokumentacijo CIPA. Zahvaljujem se tudi mag. Miranu Eriču za vsebinsko podporo o problematiki v kulturni dediščini in o računalniških potrebah arheologov ter pomoči pri pridobivanju 3D modelov arheoloških najdišč.

Hvala Alešu Jakliču za pomoč pri razumevanju rekonstrukcije s supere-lipsoidi in pomoči pri spoznavanju programa Segmentor. Hvala Krunoslavu Zubčiću za izdelavo in posredovanje 3D modela najdišča v Kupi. Hvala Ani Dejanović za pomoč pri izrazoslovju in pravopisu. Posebna zahvala tudi družini, prijateljem in sodelavcem na Zemanti, ki so me skozi študij vedno podpirali.

Prijateljem, ki niso nikoli podvomili.

Kazalo

Povzetek

Abstract

1	Uvod	1
2	Problematika dokumentacije kulturne dediščine	3
2.1	3D dokumentacija suhozemne dediščine	5
2.2	3D dokumentacija podvodne dediščine	7
2.3	3D dokumentacija pod vodo	7
2.4	Pomen obdelave 3D podatkov	9
3	Podvodna 3D dokumentacija	11
3.1	Informacije o prostoru	11
3.2	Zajem z aktivnimi 3D merilniki	13
3.3	Večslikovna fotogrametrija	13
3.4	Izbira metodologije 3D zajema	16
3.5	Računalniška obdelava podatkov	16
3.6	Arhiviranje	17
4	Rekonstrukcija prostora	19
4.1	Oblak točk	19
4.2	Površinski modeli	20
4.3	Volumetrični modeli	22
4.4	Rekonstrukcija s predznanjem	26

4.5	Indeksiranje prostora	28
5	Segmentacija prostora	31
5.1	Segmentacija oblakov točk	32
5.2	Segmentacija trikotniških mrež	33
5.3	Rekonstrukcija s segmentacijo	35
6	Računalniška podpora in izzivi	39
6.1	Geografski informacijski sistemi	39
6.2	Kiberarheologija in navidezna resničnost	41
6.3	Iskanje oblik in klasifikacija	43
6.4	Avtomska pridobitev informacij o obliki	44
6.5	Arheološke skice	44
6.6	Arheološka rekonstrukcija	45
6.7	Analiza lončene posode	45
6.8	Izzivi semantične analize	46
6.9	Iskanje po podatkovni bazi 3D modelov	49
6.10	Drugi izzivi	50
7	Metode	51
7.1	Programsko okolje	51
7.2	Priprava fotogrametričnih 3D modelov	57
7.3	Rekonstrukcija superelipsoidov	62
7.4	Iskanje podobnih superelipsoidov	73
8	Rezultati	75
8.1	Stebri templja Neptun	75
8.2	Telesa antičnih amfor	76
8.3	Primerjava z izmerjenimi dimenzijami	78
8.4	Primer iskanja podobnih oblik	81
9	Sklepne ugotovitve	83

Seznam uporabljenih kratic

kratica	angleško	slovensko
AUV	Autonomous Underwater Vehicle	Samostojna podvodna plovila
DGPS	Differential Global Positioning System	Diferencialni globalni pozicijski sistem
GIS	Geographic information system	Geografski informacijski sistem
DGPS	Differential Global Positioning System	Diferencialen satelitski navigacijski sistem
ROV	Remotely Operated Vehicle	Avtomatsko vodena podvodna plovila
ToF	Time-of-Flight	Merjenje časa potovanja
SaaS	Software as a service	Programska oprema kot storitev

Povzetek

Naslov: Segmentacija in rekonstrukcija kulturne dediščine iz fotogrametrično pridobljenega oblaka točk

V magistrskem delu smo se osredotočili na problematiko rekonstrukcije in segmentacije kulturne dediščine iz fotogrametrično pridobljenih oblakov točk. Opisali smo metodologijo arheološke 3D dokumentacije dediščine na suhem in pod vodo, povzeli sodobne tehnike rekonstrukcije in segmentacije prostora ter pripravili pregled primerov in izzivov računalniške podpore arheologiji. Posodobili smo orodje za segmentacijo s superelipsoidi in ga vključili v okolje Meshlab. Implementirali smo tudi nadzorovano postavitve začetnih semen za segmentacijo ter metodo deformacije superelipsoida, primerno za modeliranje teles amfor ter drugih vaz in posod. Rekonstruirali smo številne superelipse iz 3D modelov najdišč na suhem in pod vodo ter na spletu dostopnih amfor.

Ključne besede: računalniški vid, 3D, segmentacija, 3D rekonstrukcija, kulturna dediščina, podvodna arheologija, superkvadrniki, deformirani superelipsoidi, sarkofagi, opeka, amfore.

Abstract

Title: Segmentation and reconstruction of cultural heritage based on photogrammetric point clouds

In this thesis we focus on reconstruction and segmentation of cultural heritage based on photogrammetric point clouds. We present the methodology of archaeological 3D documentation on land and underwater, state-of-the-art reconstruction and segmentation techniques, and prepare an overview of use cases and current issues in computer science in archaeology. We updated Segmentor, a tool for segmentation with superellipsoids, ported it into a library and included it as a plugin in 3D modelling tool Meshlab, a well established tool for 3D modelling. We implemented a supervised method of creating initial seeds for segmentation and a global deformation method for superellipsoids, suitable for modelling amphoras and similar artifacts. We reconstructed a dozen of superellipsoids from 3D models of archaeological sites and of different amphoras accessible on the web.

Keywords: computer vision, 3D, segmentation, 3D modelling, cultural heritage, underwater archaeology, superquadrics, deformed superellipsoids, sarcophagi, stone bricks, amphoras.

Poglavje 1

Uvod

Kulturno dediščino nenehno ogrožajo naravni in človeški dejavniki, za zaščito potrebno dokumentacijo pa omejujejo finančna sredstva, časovne omejitve in pogosto človeku neprijazno okolje (podvodna dediščina). 3D dokumentacija kulturne dediščine je skrajšala operativni čas in prinesla natančne 3D predstavitve najdišč, ko so pogosto vsaj primerljive ali celo boljše kot tradicionalna arheološka dokumentacija. Žal so pridobljeni 3D modeli zaradi ogromnega števila točk primerni predvsem za vizualizacijo, za morebitno računalniško analizo najdišča ali posameznih najdb pa je potrebna segmentacija oblaka točk v smiselne enote. Pri tem pa naletimo na probleme zaradi pomanjkanja avtomatske ali vsaj polavtomatske metodologije za modeliranje in rekonstrukcijo kulturne dediščine.

Superkvadriki so kompakten in učinkovit način modeliranja prostora. Poleg enostavnih oblik lahko s pomočjo globalnih in lokalnih deformacij kljub morebitnim poškodbam predmetov predstavimo tudi kompleksnejše oblike, kot so stebri, sarkofagi, amfore ter druge vaze in lončene posode.

V magistrskem delu opisujemo problematiko dokumentacije kulturne dediščine, predstavljamo metodologijo 3D dokumentacije, pregled sodobnih tehnik rekonstrukcije in segmentacije prostora ter uspešne primere in pa ključne izzive pri nadaljnjih rešitvah računalniške podpore arheološki dokumentaciji.

Glavni cilj dela je pripraviti orodje za polavtomatsko rekonstrukcijo in segmentacijo posameznih objektov v trikotniških mrežah, zgrajenih na podlagi fotogrametrično pridobljenih oblakov točk.

Dodatna cilja naloge pa sta predstavitev celotne metodologije zajema, nadaljne obdelave, segmentacije in rekonstrukcije predmetov kulturne dediščine ter implementacija deformacije superelipsoidov za modeliranje predmetov kompleksnejših oblik. Namen dela je s pomočjo segmentacije in rekonstrukcije pripraviti temelj za nadaljno računalniško obravnavo in obdelavo 3D prostora.

V Poglavju 2 podrobneje opisujemo problematiko dokumentacije kulturne dediščine na suhem in pod vodo. Na kratko predstavljamo tudi vpeljavo 3D dokumentacije podvodne dediščine v Sloveniji ter vlogo računalniške obdelave 3D prostora. V Poglavju 3 se osredotočimo na metodologije podvodne 3D dokumentacije, skozi poglavje pa iščemo vse pomembne vzporednice s suhozemno dokumentacijo. V Poglavju 4 sledi predstavitev vrst in tehnik rekonstrukcije prostora, v Poglavju 5 pa opisujemo algoritme segmentacije oblakov točk in trikotniških mrež ter pristop rekonstrukcije na podlagi segmentacije. V Poglavju 6 povzemamo nekaj pomembnejših raziskav na področju računalniške podpore arheologiji ter predstavimo ključne izzive pri razvoju nadaljnjih rešitev. V Poglavju 7 sledi podrobnejša predstavitev pridobljenih 3D modelov, opis lastnosti in značilnosti superelipsoidov, izpeljava metode deformiranja z valovitim simetričnim šiljenjem, povzetek rekonstrukcije in opis posodobitve Segmentorja v vtičnik MeshSegmentor za program Meshlab. V Poglavju 8 pa predstavljamo narejene eksperimente in pridobljene rezultate.

Nekaj rezultatov iz tega magistrskega dela je že bilo objavljenih v mednarodni reviji *Journal of Archaeological Science* [28].

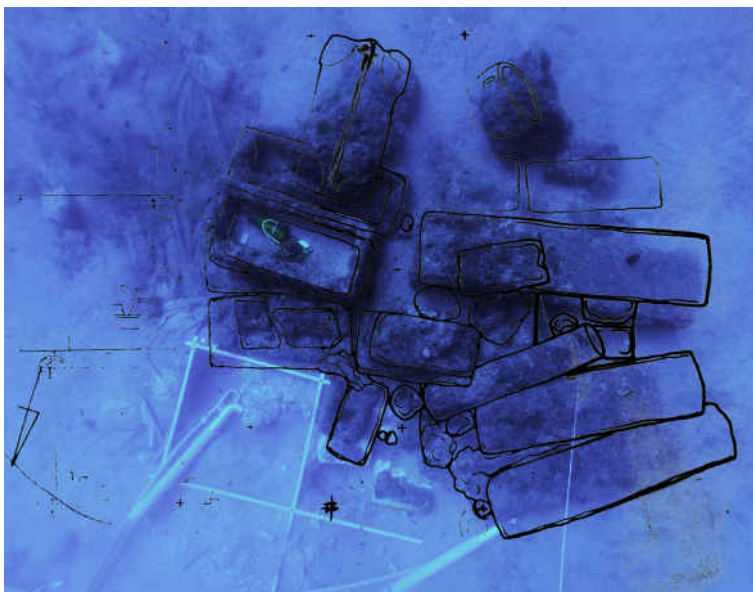
Poglavje 2

Problematika dokumentacije kulturne dediščine

Najpomembnejši del procesa razumevanja arheološke dediščine je celovito, natančno in čimbolj popolno dokumentiranje [66]. Dediščina je minljiva zaradi naravnih erozijskih procesov ter namernega in nenamernega človeškega uničevanje dediščine [65], dostopnost širši javnosti pa je pogosto omejena (podvodna dediščina). Naloga arheologov in drugih strokovnjakov na področju zaščite kulturne dediščine je sistematična priprava celovitega dokumentarnega gradiva.

Arheološka dokumentacija je sistematično urejena zbirka podatkov o organizaciji, izvedbi in rezultatih arheološke raziskave [49]. Namen arheološke dokumentacije je:

- zagotoviti trajni obstoj arheoloških ostalin v dokumentacijskih medijih in tako za prihodnost ohraniti informacije in znanje o arheoloških ostalinah in raziskavi,
- s sistematičnim zapisom (besedilom, zbirko merskih in drugih podatkov, risbo, fotografijo in drugimi vizualnimi sredstvi) omogočiti podlago za čim verodostojnejšo poznejšo interpretacijo in poustvaritev arheoloških ostalin,



Slika 2.1: Primer odstopanja ročnih meritev pod vodo na najdišču sarkofagov, Sutivan, Brač. Foto: Rok Kovačič, Golden Light Photography.

- z dogovorjenimi načini in oblikami zapisa omogočiti korektno in čim bolj celovito sporočanje podatkov o organizaciji, poteku in rezultatih raziskav strokovni in drugi javnosti.

Analogne oblike dokumentiranja najdišč in predmetov (risana gradiva) imajo vrsto nezanemarljivih pomanjkljivosti [16, 25, 28], kakršne so lahko človeška površnost in subjektivne interpretacije v postopku sistematičnega ustvarjanja dokumentarnega gradiva (primer vidimo na sliki 2.1). V sodobni arheologiji se je zaradi zmogljivosti in dostopnosti informacijskih tehnologij razširila uporaba digitalnih naprav in programske opreme za ustvarjanje dokumentarnega gradiva, hkrati pa tudi priprava sodobnejšega interpretacijskega gradiva.

V ta nabor so v preteklosti spadali predvsem fotografije in videoposnetki najdišča, danes pa zaradi cenovne dostopnosti [63] vedno pogostejše govorimo tudi o 3D dokumentaciji z aktivnimi 3D merilniki [5, 51] ter s pomočjo stereo-fotogrametrije [5, 12, 16]. Slednja se dokazuje kot najbolj učinkovita [12, 16] zlasti zaradi cenovne ugodnosti, enostavnosti uporabe in

primerljive natančnost z aktivnimi 3D merilniki. V nasprotju z 2D fotografijo, kjer je smer pogleda nesprejemljivo določena, lahko s 3D modelom pridobimo simuliran virtualen vpogled v dokumentirane površine ali predmet za potrebe ogledovanja, poučevanja in raziskovanja. Poleg potencialne avtomatske in pol avtomatske računalniške analize 3D modela pridobimo tudi zmožnost trajnega arhiviranja digitalne arheološke dokumentacije.

Potencial 3D gradiva je lahko veliko večji kot potencial gradiva, pridobljenega s tradicionalnimi tehnikami, vendar zahteva celovito spremembo delovnega procesa [9]. Ker rezultati niso na voljo takoj, moramo usmeriti veliko pozornosti v ustrezno zajemanje fotografij, postavlja pa se še vprašanje ustreznega arhiviranja ogromnih količin podatkov, ki jih proizvedemo s 3D dokumentacijo.

2.1 3D dokumentacija suhozemne dediščine

Pri dokumentaciji kopenske kulturne dediščine so se v sodobni arheologiji uveljavili aktivni 3D merilniki, ki za razliko od pasivnih projicirajo lasten vir svetlobe. V uporabi so predvsem laserski, ki delujejo na podlagi triangulacije ali strukturirane svetlobe ter merilniki TOF za večje ali težje dostopne površine [65, 51]. Vedno bolj pa laserske merilnike zamenjujemo z ugodnejšo in pogosto varnejšo belo svetlobo (slika 2.2).

Tradicionalna fotogrametrija (t. i. aerofotogrametrija) se je pojavila že v 30. letih prejšnjega stoletja in se ohranila kot ključno orodje za izdelavo topografskih zemljevidov [43]. Digitalna fotogrametrija „od blizu“ (angl. close range photogrammetry) se v principu ne razlikuje od aerofotogrametrije, o njej pa govorimo, ko obdelujemo fotografije večjih in manjših objektov z žabje perspektive. Kakovost rezultata je bila dolgo časa omejena s procesorsko močjo in delovnim spominom računalnikov, zdaj pa kakovost raste premo sorazmerno z njunim razvojem.

Starejše metode fotogrametrije so temeljile na stereo parih fotografij, danes pa je najpogostejše v uporabi večslikovna fotogrametrija (angl. multi-



Slika 2.2: Merilnik Artec MHT s tehnologijo strukturirane svetlobe, priljubljen tudi v Sloveniji. Vir: <http://www.artec3d.com/hardware/artec-mht/> (23.3.2015).

image photogrammetry) oz. struktura iz gibanja (angl. structure from motion) [44]. Pri tej metodi se optične karakteristike kamere in relativne razdalje med točkami izračunavajo na podlagi korespondenčnih točk iz večjega seta fotografij.

Skupaj s pojavom računalniških oblakov in poslovnih modelov SaaS, kjer se programska oprema preko spleta ponuja kot storitev, so se v zadnjih desetletjih razširile različne plačljive in brezplačne spletne rešitve za fotogrametrijo [5] in tako približale 3D dokumentacijo širšemu krogu strokovnjakov. Poleg spletnih storitev obstajajo tudi namenski programi, kot je Agisoft PhotoScan, kjer lahko z enostavnim uporabniškim vmesnikom proizvedemo rezultat z napako med fotogrametrično pridobljenimi in geolociranimi točkami do 1 cm [10].

Fotogrametrične oblake točk pa lahko kombiniramo tudi z meritvami laserskih merilnikov, ko z aktivnim merilnikom do določenih predelov (npr. stropi stavb) ne moremo doseči [23].

Povečana uporaba 3D tehnologij je povzročila fragmentacijo različnih postopkov in metodologij, zato se je kmalu pojavila potreba po standardizaciji

postopkov dokumentacije [16].

2.2 3D dokumentacija podvodne dediščine

Po UNESCO-vi konvenciji 2001 (157/2009) je priporočeno puščanje podvodne dediščine *in situ*, saj se razpad prične takoj ob stiku z zrakom. S pomočjo 3D dokumentacije so Bandiera et al. [1] na manjšem lesenem predmetu opazili skupno 0,6 mm povprečno razliko med izmerjeno površino prvega in zadnjega snemanja na suhem v istem dnevu. Avtorji tako opozarjajo, da je takojšen zajem površine s 3D merilniki nujen, saj je razpad kljub dragi konservaciji hiter in neizogiben.

2.3 3D dokumentacija pod vodo

Dokumentiranje podvodnih površin ovira vrsta fizičnih (omejeno gibanje, morski tok, slaba vidljivost, dostopnost, vplivi globine, razpoložljiv čas ...) [66] in pa tudi tehničnih ovir, ki vplivajo na kakovost rezultatov, med drugimi razpršitev in absorpcija svetlobe, motnje v vidnem polju (zračni mehurčki, alge, majhne ribe ...) ter motnost medija, kar zmanjšuje kontrast in svetilnost, poveča izgubo podrobnosti in spremembo teksture [4, 78]. Kljub neugodnim okoliščinam poznamo tudi podvodne aktivne in pasivne 3D merilne tehnologije [3].

Prve tehnologije, ki so omogočale podvodno 3D dokumentacijo, so lidarji, enosnopni in večsnopni sonarji, podpovršinski sonarji in tahimetri za geolociranje najdišča [20]. Prvi poskusi fotogrametrije pod vodo so bili zamudni [17], saj so morale biti posnete fotografije čimbolj poravnane, kasneje pa je bilo potrebno v laboratoriju ročno poiskati korespondenčne točke na stereo parih fotografij.

3D dokumentacija s fotogrametrijo poleg večje natančnosti informacije zmanjšuje operativni čas pod vodo, kar neposredno vpliva na varnost pri delu in zmanjšuje skupne stroške [16]. V primerjavi z aktivnimi tehnikami



Slika 2.3: Označevanje elementov zgodnjerimske tovarne ladje v reki Ljubljani. Foto: Rok Kovačič, Golden Light Photography.

je fotogrametrija cenovno ugodnejša in enostavnejša za uporabo, pridobljen oblak točk je čistejši in bolj gost. Vendar pa je pri fotogrametriji ključna kvaliteta teksture vhodnih slik in visoka resolucija, zato so rezultati za razliko od aktivnih tehnik manj stabilni [3].

Kljub sodobnemu razcvetu 3D tehnologij v podvodni arheologiji še vedno prevladuje tradicionalna ročna in analogna dokumentacija [16].

2.3.1 Podvodna 3D dokumentacija v Sloveniji

Pri dokumentiranju zgodnjerimske tovarne ladje iz 1. st. n. št. v Sinji Gorici oktobra 2012 je bila prvič v Sloveniji uporabljena metodologija namenskega fotogrametričnega snemanja za izdelavo 3D modela [17]. Za ročno dokumentiranje 8 m² površine bi po takratni oceni terena potrebovali 25 potapljaških ur, za fotogrametrično fotografiranje treh različnih stanj, v katerih je bila ladja med izkopavanjem iz mulja, pa le 3 potapljaške ure. Na sliki 2.3 lahko vidimo potapljača med označevanjem elementov ladje za potrebe 3D dokumentacije.

2.4 Pomen obdelave 3D podatkov

3D model v obliki trikotniške mreže ali oblakov točk je mogoče sistematično in načrtno proučevati, izbrane površine pa anotirati z dodanimi informacijami (geografski podatki, fotografsko gradivo, datacija ...), segmentirati in klasificirati [17]. Z avtomatiziranim iskanjem in analiziranjem površin je mogoče na modelu poiskati značilne elemente, ki bi sicer lahko bili zaradi omejenega časa v naravnem okolju spregledani. Tako je nov izziv priprava računalniških orodij za podporo raziskovanju kulturne dediščine [57].

Za obravnavo in preučevanje arheoloških predmetov so ključne naslednje funkcije:

- iskanje po digitalnih zbirkah,
- interaktivna vizualna analiza brez izgube natančnosti ali kvalitete,
- fleksibilna orodja za primerjavo morfologij,
- izboljšana orodja za sklepanje o morfologiji.

Ključna potreba arheologov in strokovnjakov na področju kulturne dediščine pa je integracija dosedanjega znanja s 3D gradivom. Tako potrebujemo napredne tehnologije upravljanja podatkov, ki so zmožne povezati vsakršen medij s korespondenčno točko ali regijo v 3D modelu. Primer orodja, s katerim se poskuša zadostiti naštetim ciljem, je 3D-CONFORM ¹.

¹<http://www.3d-coform.eu>

Poglavje 3

Podvodna 3D dokumentacija

Rezultati vseh izkopavanj so podatki o stratigrafskem zapisu, najdbah, in vzorcih [49], dokumentirani so pisno, mersko in vizualno-grafično. V osnovi 3D dokumentacija služi kot podpora vizualno-grafičnemu zapisu podatkov, v podvodni arheologiji pa si želimo zaradi drugačnega okolja in delovnih pogojev tradicionalno dokumentacijo popolnoma zamenjati z digitalno [16].

Postopki 3D dokumentacije v Sloveniji še vedno niso standardizirani [16, 66], so se pa vsaj s suhozemno dokumentacijo uveljavili različni „de facto“ pristopi, ki jih lahko v večji meri apliciramo tudi na podvodno dokumentacijo. Pomanjkanje standardov pri pridobitvi in upravljanju 3D dokumentacije je dolgo časa zaviralo njeno širšo uporabo [47].

V nadaljevanju bomo predstavili ključne člene podvodne 3D dokumentacije, ki so skupni večini pristopov dokumentiranja podvodne dediščine, izhajajo pa iz večletnih izkušenj pri suhozemni 3D dokumentaciji.

3.1 Informacije o prostoru

Fotogrametrično pridobljeni 3D modeli za razliko od rezultatov nekaterih laserskih merilnikov (npr. Artec MHT) nimajo informacije o absolutnih razdaljah med točkami, zato moramo prostor dodatno informirati. Bistvena stalokacija najdbe in njen izvoren kontekst (do 5 cm natančno v 3D prostoru)



Slika 3.1: Umeščanje opazovanega objekta v prostor s pomočjo referenčne kocke.

ter umestitev lokacije v državni koordinatni sistem, v nekaterih primerih pa tudi lokacija znotraj stratigrafske enote, če je ta obsežna [49].

Koordinate GPS lahko zagotovimo z elektronskimi tahimetri ob obali in pri nižjih globinah, drugje pa s sistemi DGPS [20], za skaliranje v absolutni koordinatni sistem pa je običajno dovolj nekaj izmerjenih referenčnih dolžin [9].

Za lažje umeščanje objekta v prostor lahko uporabimo tudi referenčne objekte, kot je npr. merska kocka na sliki 3.1. Kocka dimenzij 1 dm^3 je opremljena z libelo in kompasom ter tako omogoča ročno ali avtomatsko pridobitev naslednjih informacij o prostoru:

- absolutna velikost objekta in okolice,
- absolutne razdalje med točkami,
- absolutna lega objekta glede na površje in strani neba.

3.2 Zajem z aktivnimi 3D merilniki

Večino aktivnih 3D merilnikov uporabljamo na kopnem in razmeram pod vodo niso prilagojeni, vendar lahko enako tehnologijo uporabljamo tudi pod vodo [39]. S strukturirano svetlobo lahko dobimo natančnejše batimetrične rezultate kot z večsnopnim sonarjem [54]. Za potrebe 3D dokumentacije najdišča pa se postavlja vprašanje, če je selitev dragih 3D merilnikov pod vodo smiselna, saj lahko prav tako natančne rezultate pridobimo s cenovno veliko ugodnejšim fotoaparatom [14].

Ključne ovire, s katerimi se srečujemo pri merilnikih pod vodo, so [39]:

- kalibracijo kamer moramo opraviti pod vodo zaradi loma svetlobe in odboja med mediji (voda, zrak, prozorno stekleno ali plastično ohišje),
- težave pri iskanju laserske konice zaradi odboja svetlobe in razpršitve - manjšo razpršitev dosežemo z zmanjšanjem jakosti laserja,
- električni, kvantizacijski in *speckle* šum,
- lomni indeks vode je odvisen od sestave vode (vrsta in število delcev je vsakič drugačna).

Zaradi naštetih ovir se aktivni 3D merilniki pod vodo za namene arheološke dokumentacije ne uporabljajo.

3.3 Večslikovna fotogrametrija

Prvi fotogrametrični poskusi dokumentiranja pod vodo so se pričeli izvajati v šestdesetih letih prejšnjega stoletja [12]. Leta 1964 so zajeli prve fotografije s stereoskopom, leta 1972 pa je uspela ena prvih večjih fotogrametričnih dokumentacij brodoloma rimske ladje na globini med 20 m in 40 m.

Danes je fotogrametrija zaradi cenovne ugodnosti, zadovoljivih rezultatov, enostavne uporabe in relativno hitrega akumuliranja rezultata najbolj uporabljena metoda 3D dokumentacije [17].

3.3.1 Izbira fotoaparata in zajem fotografij

Na natančnost 3D modela najbolj vpliva resolucija zajetih fotografij [43], kjer moramo za zadovoljive rezultate uporabiti kamero z vsaj 6 megapiksli. Pri kalibraciji kamere sta možna dva pristopa: prilagoditev vodnemu mediju in uporaba standardne kalibracije. Slednja je bolj zaželeno, saj lahko za obdelavo fotografij uporabimo prosto dostopne storitve, vendar so rezultati zato močno odvisni od optičnih karakteristik ohišja. Drugi pomembni faktorji so še:

- fleksibilnost dolžine leč (krajša za fotografije „od blizu“),
- ročen fokus,
- nadzor nad prejeto svetlobo,
- ročna izbira formata (format RAW je brezizguben in tako omogoča kasnejše reduciranje kvalitete fotografije),
- velikost piksla [52], na podlagi katere določimo ciljno natančnost modela,
- čim manjše popačenje fotografij zaradi leč (angl. lense distortion).

Vsaka fotografija mora biti pravilno izpostavljena in osvetljena. Sosednje fotografije se morajo prikrivati vsaj v 30 % in nobena ne sme biti meglena. Fotografije lahko skoraj vedno zajema potapljač, v težje dostopnih predelih pa si lahko pomagamo tudi z avtonomnimi podvodnimi vozili (AUV) ali ročno vodenimi podvodnimi vozili (ROV).

Uporaba bliskavice je v globini pod 30 m obvezna, saj se barva od rdeče proti modri valovni dolžini v vodi počasi izgublja [62]. Obseg bliskavice je omejen na 1,5 m, saj so po tej razdalji barve že močno degradirane. V primeru, da bliskavice ne moremo uporabljati, moramo zaslonko in hitrost zaklopa skrbno prilagoditi razmeram.

3.3.2 Obdelava v mrežo

Obdelavo serije fotografij v mrežo lahko opišemo v treh korakih:

1. iskanje in izbira korespondenčnih točk,
2. pridobitev oblaka točk na podlagi triangulacije korespondenčnih točk,
3. konstrukcija 3D trikotniške mreže iz oblaka točk.

Opisani koraki se v izvedbi razlikujejo med različnimi fotogrametričnimi storitvami in posledično vračajo različne rezultate. V primeru storitve PHOV Mementify ¹ se v 3. koraku okoli oblaka točk ustvari umeten poligon, ki se s postopnim zmanjševanjem volumna vedno bolj prilega oblaku točk. Ko poligona ni mogoče več smiselno skrajšati, iz njega ustvarimo trikotniško mrežo [28].

Če je kvaliteta vhodnih fotografij preslaba za fotogrametrično obdelavo, jih lahko podkrepimo s predprocesiranjem [41]:

1. restavracija fotografij - (predznanje o prostoru, npr. koeficienti atenuacije in razpršitve, globina ...),
2. izboljšava fotografij (predznanje o prostoru ni potrebno).

Ker je nemogoče zagotoviti predznanje o dinamičnem podvodnem okolju, za predprocesiranje uporabljamo algoritme za izboljšavo fotografij:

- algoritem za popravljanje neenakomerne iluminacije, slabega kontrasta in zadušenih barv [2],
- ACE („Automatic Color Equalization“) za avtomatsko popravljanje barv [53],
- IACE („Image Adaptive Contrast Enhancement“) za izboljšanje kontrastov [31],
- algoritem za izboljšavo fotografij na podlagi integriranega barvnega modela [27].

¹<http://www.phov.eu/>

3.4 Izbira metodologije 3D zajema

Na suhem sta metodologiji fotogrametrije in zajema s 3D merilniki komplementarni [33], saj ena in druga ob različnih pogojih lahko proizvedeta najboljši rezultat. Pri fotogrametriji je kakovost rezultata odvisna predvsem od kakovosti zajetih fotografij, ciljne natančnosti in pa tehničnih lastnosti fotoaparata (npr. velikost piksla). Pri zajemu s 3D merilniki pa smo odvisni od naprave, saj so nekatere primernejše za večje objekte (npr. zgradbe) ali ogromne površine (merilniki TOF), druge pa za manjše predmete maksimalne velikosti enega kubičnega metra (merilniki na podlagi strukturirane svetlobe).

Izbira metodologije na suhem je odvisna od dveh spremenljivk: kompleksnosti scene (ocena števila točk) in velikosti scene [52]. Pri manjši kompleksnosti in velikosti do 10 m so ročne meritve in skice dovolj dobra rešitev, pri večji kompleksnosti pa postanejo 3D merilniki in fotogrametrija primernejši. Pri scenah velikosti okoli 1 km za manjšo kompleksnost do 100 točk so najprimernejše totalke, pri kompleksnosti do milijona točk pa aerofotogrametrija in tehnologija LiDAR. Pri velikostih več 100 km pa si lahko pomagamo le še s satelitskimi slikami.

Pod vodo smo omejeni na metodologijo fotogrametrije, saj za arheološko dokumentacijo specializiranih 3D merilnikov ni.

3.5 Računalniška obdelava podatkov

3D vizualizacija omogoča virtualen vpogled v najdišče in je skoraj primerljiva dejanski obravnavi *in situ*. Vendar je pa ključna dodana vrednost digitalizacije dediščine možnost povezovanja dokumentarnega gradiva z bazo znanja arheologov in drugih strokovnjakov pri zaščite kulturne dediščine. Zato morajo vmesniki, ki prikazujejo virtualno najdišče omogočati povezljivost z drugimi viri in anotacije v smislu ekspertnega znanja. Prvi takšni vmesniki so omogočali le ročno vnašanje podatkov za potrebe nadaljnjega iskanja [13, 59], danes pa bi s pomočjo strojnega učenja lahko omogočili avtomatsko ekstrak-

cijo dokumentacijskih podatkov [22], kot so morfološke značilnosti in drugi parametri, ki lahko privedejo do učinkovite klasifikacije.

Pomembna tehnologija, ki jo druge panoge (industrija, medicina) že uporabljajo pri obravnavi 3D tehnologij, je segmentacija. Avtomatsko razvrščanje bližnjih površin poleg osredotočene obravnave omogoča tudi odkrivanje in poudarjanje naravnih značilnosti [16]. Meritvena orodja s poznavanjem konteksta, analiza površine in generatorji skic so tako potrebne zmožnosti, ki spremenijo 3D modele iz predstavitvenega v nepogrešljivo analitično orodje.

Če povzamemo, morajo orodja za zaščito kulturne dediščine implementirati dve enakovredno pomembni delovni perspektivi:

1. analiza 3D modela,
2. vizualizacija 3D modela.

Prva mora tako omogočati segmentacijo modela, meritve razdalj, površin in volumnov, preseke modela z ravninami (generacija skic), povezljivost z podatkovnimi bazami GIS ter ročno in avtomatsko klasifikacijo, druga pa poleg vizualizacije posameznega modela tudi prikaz vseh povezanih podatkov: ročne meritve, multimedijo (fotografije in videoposnetki), podatke za GIS, beležke, razpredelnice idr.

Naštete funkcionalnosti so danes žal porazdeljene med veliko različnih orodij, pogreša pa se celovita rešitev.

3.6 Arhiviranje

Arheološke podatke sestavljajo tekstovne informacije, mere, skice, fotografije, 3D modeli in velika količina povezav med podatki in historičnimi informacijskimi viri [35]. Količina samih podatkov in povezav med njimi je lahko ogromna, zato mora arhiv omogočati učinkovito indeksiranje vseh oblik informacij. Ključne naloge arhivov lahko povzamemo v naslednjih točkah:

1. arhiv mora omogočati povezovanje in predvsem učinkovito iskanje informacij, tudi na podlagi sorodnih podatkov,

2. 3D modeli morajo biti indeksirani, iskalne poizvedbe pa možne tudi s 3D modeli [19, 59].

Za indeksiranje 3D modelov so trenutno najbolj v uporabi KD-drevesa in osmiška drevesa.

Poglavje 4

Rekonstrukcija prostora

4.1 Oblak točk

Oblak točk je najpreprostejša in hkrati najobsežnejša oblika 3D predstavitve [65], kjer je vsaka izmerjena točka v realnem prostoru predstavljena s koordinatami x , y in z . Oblak točk je večinoma surovi rezultat 3D merilnikov in fotogrametrije [52] ter je lahko umeščen v realni ali pa lokalni koordinatni sistem.

Za avtomatsko umestitev v realni koordinatni sistem morajo merilniki podpirati vnos realnih koordinat, najpogosteje izmerjenih z elektronskimi optičnimi inštrumenti, npr. totalnimi. V primeru, da je rezultat v lokalnem koordinatnem sistemu, lahko z operacijami translacije in skaliranja vsak takšen sistem pretvorimo v absoluten koordinatni sistem.

4.1.1 Vizualizacija neprekinjene površine

Oblake točk lahko vizualiziramo kot neprekinjene površine s pomočjo:

- lokalne dinamične triangulacijske hervistike [70],
- direktnega lepljenja površinskih elementov (angl. direct surface element splatting) [48],

- implicitnih funkcij [69] in metode najmanjših kvadratov ocenjujemo razdaljo med izmerjenimi točkami in orientacijskimi točkami.

4.2 Površinski modeli

Površinski modeli nam omogočajo predstavitev površine opazovanega objekta. Oblak točk, izmerjen s pomočjo 3D merilnikov ali fotogrametrije, lahko kategoriziramo kot površinski model, vendar bi zaradi svoje strukture lahko predstavljal notranjo sestavo nekega objekta. Zato v nadaljevanju opisujemo modele, ki modelirajo izključno površino.

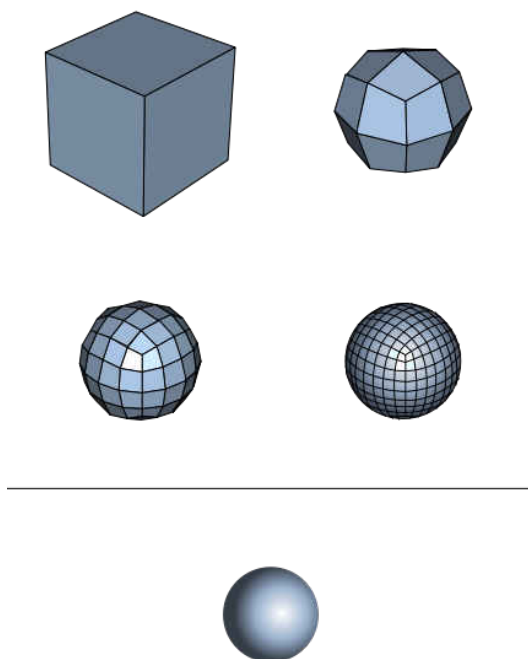
4.2.1 Trikotniške mreže

Trikotniška mreža je enostavna geometrijska predstavitev, sestavljena iz oglišč in robov, ki skupaj predstavljajo površino objekta [61]. Čeprav najpogosteje govorimo o trikotniških ali trianguliranih mrežah, so lahko osnovna sestava modela katerikoli mnogokotniki.

Trikotniške mreže se zaradi enostavnosti in nizke prostorske zahtevnosti uporabljajo predvsem za izrisovanje ter so za nadaljnjo analizo pogosto neprimerne.

Nadgradnja trikotniške mreže je podatkovna struktura ploskev-rob-oglišče (angl. *surface-edge-vertex* representation), ki vsebuje informacije o ploskvah, robovih in ogliščih opazovanega objekta ter topološke povezave med njimi. Struktura se pogosto uporablja v programskih knjižnicah za obdelavo 3D podatkov.

V podatkovni strukturi vsako oglišče nosi informacijo o točki v prostoru in vseh robovih, ki se oglišča dotikajo. Vsak rob nosi informacijo o začetni in končni točki, levi in desni ploskvi ter loku, ki definira njegovo obliko (v primeru, ko ta ni ravna črta). Vsaka ploskev ima podano površino, ki določa obliko, in serijo omejitev (oglišča in robovi).



Slika 4.1: Razčlenjevanje kocke. Vir: [76].

4.2.2 Razčlenjene površine

Razčlenjene površine (angl. subdivision surfaces) je metoda modeliranja oblike s poligoni in fraktali [74]. Tako kot lahko z razčlenjevanjem (angl. subdivision) opišemo krivuljo kot zaporedje izbrušenih polinomov, lahko obliko opišemo kot zaporedje poligonov, kjer se s številom poligonov povečuje natančnost modela (slika 4.1).

4.2.3 Modeliranje z zleпки

Danes popularni alternativni razčlenjenim površinam in trikotniškim mrežam so površine NURBS (angl. non-uniform rational B-spline) in T-zlepki.

Površine NURBS [56] definiramo z dvodimenzionalno mrežo obteženih kontrolnih točk in vozliščnimi vektorji. T-zlepki so posplošitev NURBS

površin [58], kjer lahko točke v T-mreži vsebujejo tudi T-spoje (trojne spoje) in tako posledično bolj natančno definirajo presečišča poligonov.

Z zlepki in razčlenjenimi površinami lahko z večjo natančnostjo predstavimo fine in gladke površine kot z mrežami, vendar pa samo mreže lahko popolnoma modelirajo presečišča površin.

4.3 Volumetrični modeli

Volumetrični modeli poleg implicitne informacije o površini vsebujejo tudi informacijo o prostoru, ki ga opazovani objekt zaobjema.

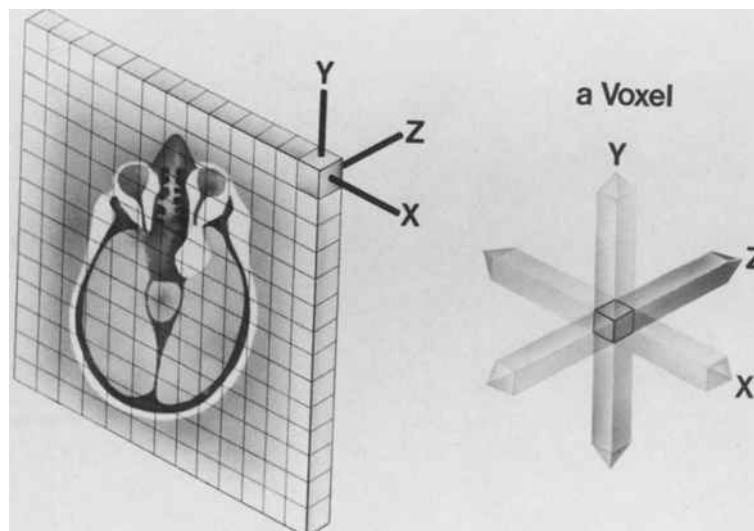
V nadaljevanju opisujemo modele, ki se še danes najpogosteje uporabljajo za volumetrično predstavitev opazovanega objekta.

4.3.1 Voksel

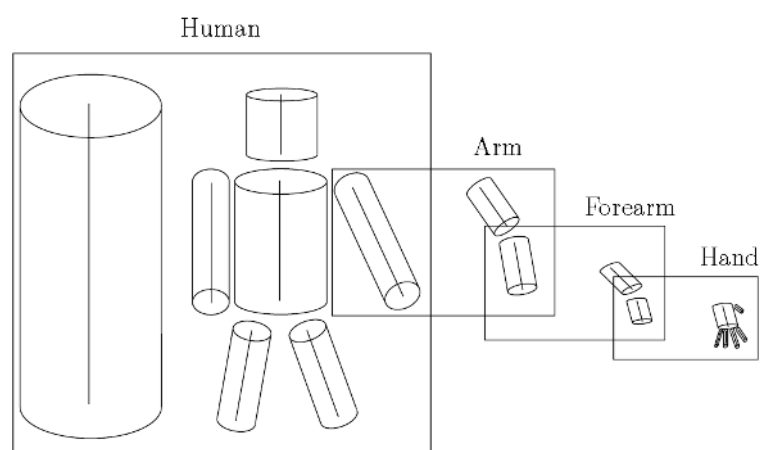
Voksel je elementarni del neke 3D scene [65], enako kot je piksel elementarni del 2D scene in je najenostavnejša oblika predstavitve volumna. Tipično voksel nima shranjenih lastnih koordinat in do njih navadno dostopamo relativno glede na ostale voksele. O vokslah se najpogosteje pogovarjamo pri obravnavi slik CT ali MRI (slika 4.2).

4.3.2 Model posplošenega valja

Posplošeni valj ali generaliziran cilinder je volumetrični primitiv, definiran s prostorsko krivuljo (osjo), ploskvijo in presečiščno funkcijo s podano ploskvijo za vsako točko na osi [61]. Model posplošenega valja vsebuje opis cilindrov, prostorske odvisnosti med njimi ter globalne lastnosti objekta. Opišemo jih lahko z dolžino osi, povprečno širino presečišč ter razmerjem dolžine in povprečne širine. S posplošenim valjem lahko opišemo različne standardne oblike, kot so valji, cilindri in stožci. Na sliki 4.3 vidimo primer človeškega telesa, predstavljenega s skupino generaliziranih cilindrov.



Slika 4.2: Voksel kot elementarni del 3D scene v medicinski sliki. Vir: [71].



Slika 4.3: Človeško telo, predstavljeno z modelom posplošenega valja. Vir: [30].

Os lahko opišemo s parametrično enačbo 4.1, kjer je s dolžina loka [30], x , y in z pa so komponente fiksnega koordinatnega sistema

$$a(s) = (x(s), y(s), z(s)) \quad (4.1)$$

Množica točk v presečišču je določena v lokalnem koordinatnem sistemu x , y s parametrom r (enačba 4.2).

$$set = (x(r, s), y(r, s)) \quad (4.2)$$

Čeprav so v teoriji posplošeni valji primerni za segmentacijo in modeliranje različnih objektov, je pridobitev posameznega modela zahteven problem predvsem zaradi kompleksne parametrizacije ter pomanjkanja metod za preverjanje odstopanj modela od realnih dimenzij opazovanega objekta.

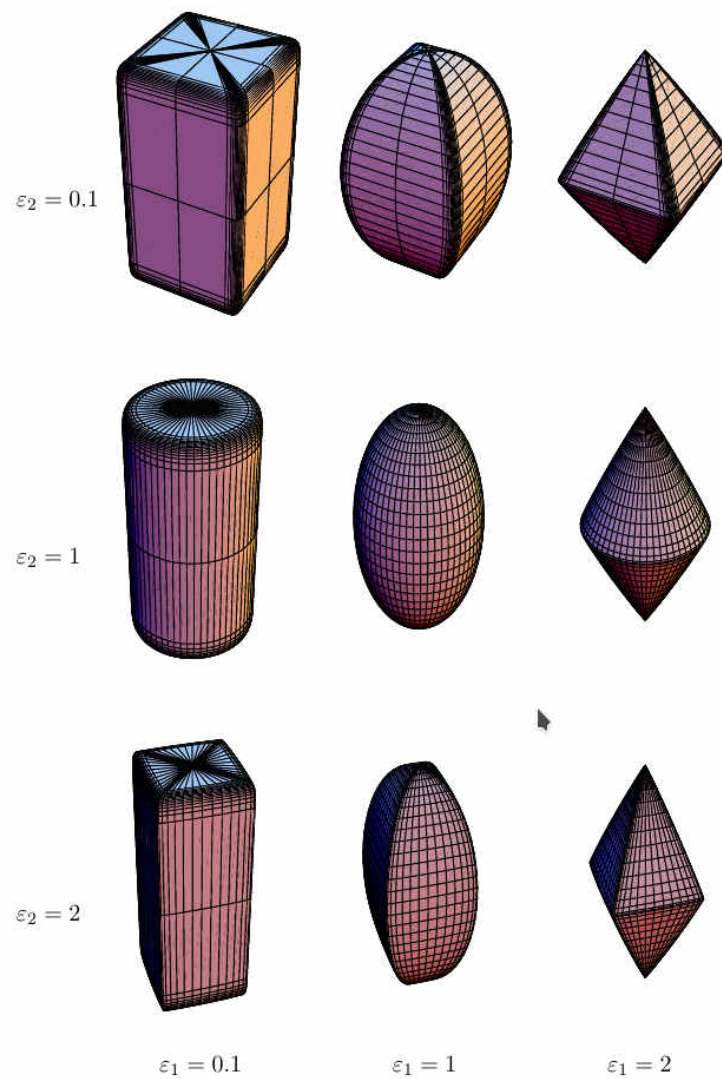
4.3.3 Superkvadriki in superelipsoidi

Superkvadrike si lahko predstavljamo kot kepe gline, ki jih po želji oblikujemo [30]. Tako kot posplošeni valji imajo majhno število parametrov in so zato popularna volumetrična oblika 3D predstavitve. Parametrična enačba superelipsoida (enačba 4.3) določa vektor s komponentami x , y in z , kjer je vsaka komponenta funkcija parametrov η in ω . Obliko superelipsoida določajo konstante a_1 , a_2 , a_3 (širina, dolžina in višina) ter ϵ_1 in ϵ_2 (oblika). Superelipsoide lahko predstavimo tudi z implicitno enačbo 4.4.

$$S(\eta, \omega) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \cos^{\epsilon_1}(\eta) \cos^{\epsilon_2}(\omega) \\ a_2 \cos^{\epsilon_1}(\eta) \sin^{\epsilon_2}(\omega) \\ a_3 \sin^{\epsilon_1}(\eta) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\left(\left(\frac{x}{a_1}\right)^{\frac{2}{\epsilon_2}} + \left(\frac{y}{a_2}\right)^{\frac{2}{\epsilon_2}}\right)^{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} + \left(\frac{z}{a_3}\right)^{\frac{2}{\epsilon_1}} = 1 \quad (4.4)$$

Superelipsoide lahko deformiramo z raztegovanjem, šiljenjem, vrtenjem in prepogibanjem. Skupino superelipsoidov lahko povežemo s pravili Booleve algebre, da skupaj sestavljajo kompleksne objekte. Na sliki 4.4 vidimo različne oblike superelipsida na podlagi vrednosti parametrov ϵ_1 in ϵ_2 .



Slika 4.4: Različne oblike superelipsoidov na podlagi vrednosti parametrov ϵ_1 in ϵ_2 . Vir: [30].

Prednosti superelipsoidov so predvsem v majhnem številu parametrov z intuitivnim pomenom, robustnih metodah rekonstrukcije iz globinskih slik ter možnosti dodatnega oblikovanja z globalnimi in lokalnimi deformacijami.

Superelipsoidi se uporabljajo tudi v računalniški grafiki, v robotiki in pri 3D modeliranju. Prednost superelipsoidov je tudi v preprostem odkrivanju prekrivanja in dinamični simulaciji. Kadar v računalniškem vidu ali v računalniški grafiki govorimo o superkvadrikih, mislimo na superelipsoide, saj družina oblik superkvadrikov vključuje tudi superhiperboloide in super-toroide.

4.4 Rekonstrukcija s predznanjem

Ko imamo informacije o opazovanem objektu vnaprej, lahko s specializiranimi tehnikami bolj natančno ali hitreje skonstruiramo model. Specializirane tehnike imenujemo rekonstrukcija s predznanjem (angl. model-based reconstruction) [69].

4.4.1 Modeliranje arhitekture

V fotogrametriji in računalniškem vidu je modeliranje arhitekture eno od najstarejših in najdaljših področij raziskovanja, saj so dobri modeli v interesu različnih panog, npr. urbanizma, arheologije in varstva kulturne dediščine. Na voljo je več metod, avtomatskih in tudi pol avtomatskih, ki na podlagi predznanja pripravljajo natančne modele ogromnih scen.

Metode uporabljajo različne pristope, ki so med sabo komplementarni:

- označevanje značilnih predelov in robov zgradb na slikah in na interaktivnem grobem modelu,
- predelava fotografij v panoramske slike,
- modeliranje z iskanjem presečišč med ravninami.

4.4.2 Modeliranje glave in obrazov

Drugo področje, kjer so specializirane tehnike modeliranja pogosto uporabne, je modeliranje človeških glav in obrazov. Čeprav se ti zdijo pogosto popolnoma različni, jih lahko zelo dobro opišemo z malo parametri. Iščemo lahko specifične značilke, ki z lego diferencirajo obraze med seboj, znani pa so tudi boljši algoritmi, kot je analiza glavnih komponent (angl. principal component analysis, PCA), s pomočjo katere lahko dobimo 3D model iz ene same 2D fotografije in morfiranja. Modeliranje glav se najbolj uporablja pri obraznih animacijah, saj lahko parametriziran 3D model uporabimo za sledenje obraznim gibom.

4.4.3 Modeliranje človeškega telesa in sledenje

Sledenje človeškim gibom, modeliranje njihove oblike in zunanje podobe ter prepoznavanje njihovih aktivnosti je eno najbolj aktivno raziskovanih področij računalniškega vida. Vhodni podatek so najpogosteje videoposnetki, lahko pa so tudi serije globinskih slik ter serija fotografij ali videoposnetkov z različnih zornih kotov. Zaradi številnosti raziskav in tehnik na tem področju jih najlažje kategoriziramo po naslednjih korakih [46]:

1. inicializacija in detekcija,
2. sledenje, modeliranje in segmentacija,
3. ocenjevanje pozicije,
4. prepoznavanje aktivnosti.

Poleg teh korakov v večini sistemov za sledenje človeškim gibom želimo modelirati tudi ozadje, da lahko prepoznamo in kasneje modeliramo premikajoče se objekte (silhuete) [69].

3D kinematični modeli

Sledenje lahko izboljšamo z uporabo 3D modelov, kjer poleg 3D skeleta uporabimo tudi kinematični model oz. kinematično verigo, ki določa dolžino vseh udov v skeletu ter 2D in 3D rotacijskih kotov med udi in drugimi segmenti [18].

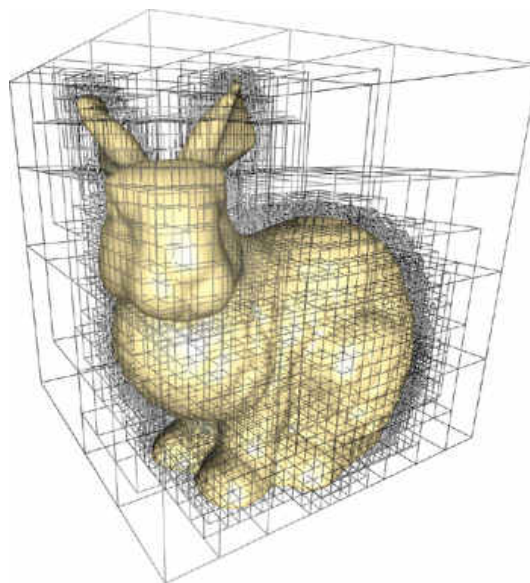
4.5 Indeksiranje prostora

Predvsem trikotniške mreže, pa tudi ostali modeli, so lahko sestavljeni iz več milijonov točk ali vozlišč. Z večjo količino podatkov se tudi povečuje čas procesiranja takšnega prostora, zato obstajajo algoritmi, ki skušajo prostorske modele particionirati za lažjo navigacijo po podatkovni strukturi. Najbolj razširjeni podatkovni strukturi za indeksiranje prostora sta osmiško drevo in K-D drevo.

4.5.1 Osmiška drevesa

Osmiško drevo je drevesna podatkovna struktura, kjer vsako vozlišče vedno vsebuje 8 otrok [59]. Glede na globino drevesa d , vsebuje osmiško drevo 8^d listov. Koren drevesa vsebuje celotno mejno območje (angl. bounding box) prostora, vsak nadaljnji otrok pa osmino tega področja. Algoritmi za pripravo strukture rekurzivno particionirajo mejno območje na osem enakih delov, dokler ne dosežemo podane globine d . Primer osmiškega drevesa vidimo na sliki 4.5.

Ker je poligon lahko vsebovan v več vozliščih, se algoritem za indeksiranje trikotniških mrež (in podobnih struktur) razlikuje pri gradnji. Tako v neko vozlišče spadajo tisti poligoni, ki se sekajo z mejnim območjem vozlišča. Pri iskanju se lahko zgodi, da poligon spada v več vozlišč. Takrat se rekurzivno preverjajo vsi otroci vozlišča, dokler ne najdemo primerne lista.



Slika 4.5: Model zajca, indeksiran z osmiškim drevesom. Vir: [36].

4.5.2 K-D drevo

K-D drevo je podatkovna struktura, kjer organiziramo točke v k -dimenzionalen prostor [59]. Vsako vozlišče, ki ni list, je razdeljeno na dva podprostora. Točke v levem listu so predstavljene z levim poddrevesom, točke v desnem listu pa z desnim poddrevesom. V 3D prostoru, kjer so x , y in z določeni kot k -dimenzije, spada neka točka v levo podrevo, če je njena x vrednost manjša od tiste v vozlišču oz. v desno, če je večja. Vsak nivo drevesa zamenja opazovano dimenzijo, tako da če v korenu opazujemo x vrednost, potem v otrocih korena opazujemo y vrednost in pri njihovih otrocih z vrednost. Tako se opazovana dimenzija ciklično menja na vsakem nivoju. Kot vrednost vozlišča se izbere vrednost mediane vseh točk, ki spadajo v to vozlišče.

Poglavje 5

Segmentacija prostora

O segmentaciji govorimo, ko želimo razdeliti sliko na množico pomenljivih regij, ki to sliko prekrivajo [61]. Regije so pogosto predpogoj za nadaljnjo analizo slik, ni pa pomembno, da popolnoma prekrijejo opazovano sliko.

Segmentacija služi dvema ciljema: (1) dekompozicija slike na predele oz. regije za nadaljnjo analizo ter (2) sprememba reprezentacije slike (npr. parametrizacija ali modeliranje).

Segmentacijo lahko delimo glede na:

1. vhodni podatek - oblak točk ali površinski model
2. zorni kot obdelave slike [60] - 3D volumetričen vpogled ali 2D površinski vpogled.

Pri volumetričnem zornem kotu obdelave želimo sliko particionirati na pomenljive volumetrične segmente za nadaljnjo obravnavo, pri površinskem zornem kotu pa dobimo regije po površini glede na njene lastnosti (npr. krivine) in tako lahko segmentacijo uporabimo za lepljenje tekstur, izdelavo grafov ali geometrijskih slik.

5.1 Segmentacija oblakov točk

Segmentacija razdeli oblak točk na predele, ki bi lahko predstavljali različne objekte [77].

Brez uporabe modeliranja s predznanjem so najuspešnejši algoritmi za razvrščanje (angl. clustering), kjer oblak razdelimo na množice točk, ki so si med sabo podobne. Poleg razvrščanja z voditelji in z združevanjem, ki jih v nadaljevanju bolj podrobno opisujemo, poznamo tudi razvrščanje s pomikanjem povprečja (angl. mean-shift clustering), kjer skušamo določiti lokalne maksimume gostot točk, ter spektralno razvrščanje (angl. spectral clustering), kjer oblak točk predstavimo kot neusmerjen graf. V grafu podobnost med paroma točk določa težo povezave, z odstranjevanjem povezav, ki imajo premajhno podobnost, pa dobimo podobne predele.

5.1.1 Razvrščanje z voditelji

Pri razvrščanju z voditelji (angl. k-means clustering) izberemo število skupin (k), nato pa naključno izberemo k točk, ki postanejo centri skupin. V prvem koraku vsaki točki izberemo pripadajočo skupino na podlagi najmanjše razdalje do centra. Nato v vsaki skupini izračunamo nov center na podlagi povprečne razdalje do vseh točk v skupini. Nato ponavljamo oba koraka, dokler se centri ne stabilizirajo oz. se točke, izbrane za center, ne spreminjajo več.

5.1.2 Razvrščanje z združevanjem

Pri razvrščanju z združevanjem (angl. agglomerative clustering) vsaka točka najprej predstavlja svojo skupino, nato pa te manjše skupine na podlagi podobnosti združujemo v večje, dokler ne dosežemo nekega podanega kriterija. Razvrščanje z združevanjem je hierarhično razvrščanje od spodaj navzgor. Za določanje razdalje med skupinami lahko uporabljamo minimalno razdaljo med njimi (angl. single linkage) ali maksimalno razdaljo (angl. complete linkage).

5.1.3 Algoritem ICP

Algoritem ICP (angl. iterative closest point) skuša oblak točk ali mrežo registrirati nekemu geometrijskemu modelu. Vhodni podatek algoritma je približek lokacije geometrijskega objekta, nato pa se parametri lokacije iterativno posodablja tako, da minimiziramo kvadrat razdalje med oblakom točk in modelom. Metodo lahko apliciramo tudi na krivulje in trikotniške mreže.

5.1.4 Segmentacija s predznanjem

Pri fotogrametrično pridobljenih oblakih točk pogosto modeliramo objekte ali površine, katerih oblike in predele poznamo vnaprej. Pri aerofotogrametriji so to lahko urbana področja, kjer lahko posamezne zgradbe predstavimo z matematičnimi primitivi, npr. poliedri.

Razširjena sta dva pristopa k modeliranju, (1) od spodaj navzgor, kjer geometrične primitive izračunamo iz oblaka točk in model zgradimo iz njih, ter (2) od zgoraj navzdol, kjer podane primitive prilagajamo predelom oblaka točk.

Predznanje lahko predstavimo kot močne omejitve (angl. hard constraints), kjer se mora model popolnoma prilagajati izbranim točkam, ter šibke omejitve (angl. soft constraints), ko dovolimo določeno deviacijo modela od oblaka točk.

5.2 Segmentacija trikotniških mrež

Na trikotniške mreže lahko vedno gledamo kot na oblak vozlišč in zanemarimo robove. Tako lahko uporabimo zgoraj naštete metode segmentacije, vendar s tem izgubimo informacijo o soseščini posameznih točk. Določene metode ne razdelijo slike direktno na regije, ampak definirajo meje med posameznimi deli mreže (podmrežami). Druge particionirajo druge modele ali 2D slike, ki predstavljajo model, in tako implicitno določajo regije na prvo-

tni mreži [60]. V nadaljevanju predstavljamo direktne tehnike segmentacije glede na aproksimacijske metode, na podlagi katerih pridobimo rezultat.

5.2.1 Rast regij

Rast regij (angl. region growing) je najenostavnejši pristop k segmentaciji mrež. V prvem koraku se postavi seme, ki nato raste v podmrežo. Algoritmi se med sabo razlikujejo po kriteriju za vključevanje nekega elementa v obstoječo regijo. Ti so lahko:

- razdalja vseh vozlišč neke ploskve do elementa,
- rast na podlagi konstantne ukrivljenosti,
- konveksna dekompozicija.

Regije lahko gradimo tudi iz več semen paralelno. Semena lahko postavimo naključno, lahko pa jih dodajamo po potrebi na podlagi območij, ki ne ustrezajo kriteriju vključevanja elementov v neko regijo. Namesto semen se lahko uporabljajo tudi izočrte, na podlagi katerih se nato gradijo regije.

5.2.2 Hierarhično razvrščanje

Algoritmi, ki uporabljajo rast regij, lahko obtičijo v lokalnih optimumih in tako proizvedejo slabši globalni rezultat, prav tako pa je rezultat močno odvisen od začetnega števila semen. Hierarhično razvrščanje se problema loti bolj globalno, saj vedno izbere najboljše združevanje regij in se ne osredotoča na rast ene.

Vsaka ploskev je v začetni fazi svoja regija. Med razvrščanjem se vsakemu paru regij oceni cena združitve, na podlagi katere se nato združi najprimernejša. Ta ocena se lahko izračuna na podlagi:

- evklidske razdalje med regijami,
- orientacije normal iz reprezentativnih ploskev,

- minimalne napake pri prilagajanju regije nekemu geometrijskemu primitivu (ploskve, sfere, valji).

5.2.3 Iterativno razvrščanje

Skupna lastnost metod iterativnega razvrščanja je vnaprej znano število regij, zato jih tudi imenujemo parametrične metode. V to kategorijo spada tudi zgoraj opisani algoritem razvrščanja z voditelji, ki ga lahko apliciramo tudi na trikotniške mreže. Ključen problem razvrščanja z voditelji je konvergenca, saj moramo izbrati najboljšega predstavnika regije (centra) tako, da bo segmentacija konvergirala k stabilni rešitvi. Za razliko od oblaka točk, kjer lahko računamo evklidske razdalje med točkami, pri mreži obravnavamo vozlišča ali ploskve, zato so mere, kot je geodetska razdalja, bolj primerne. Vendar zaradi časovne zahtevnosti računanja geodetske razdalje v realnem času raje uporabljamo algoritme rasti regij, kjer so predstavniki regij (centri) semena za rast. Druge mere oddaljenosti so lahko:

- diedrski kot med ploskvami,
- aproksimacije geodetske razdalje,
- evklidska razdalja med normalami ploskev.

5.3 Rekonstrukcija s segmentacijo

Pri rekonstrukciji volumetričnih modelov, kot so posplošeni valji ali superkvadrski [37], poteka segmentacija lahko vzporedno z gradnjo končnega modela. Za segmentacijo so v preteklosti dolgo predpostavljali, da je le-ta predpogoj za kakršnokoli rekonstrukcijo volumetričnih modelov, vendar znamo danes pridobiti volumetrične modele neposredno iz izmerjenih podatkov (npr. globinskih slik, oblakov točk ali trianguliranih mrež). Na sliki 5.1 tako vidimo, da so pridobljeni parametrični modeli hkrati tudi specifični objekti, ki bi nam jih neka metoda segmentacije lahko vrnila kot rezultat.



Slika 5.1: Pridobljeni superelipsoidi iz 3D modela najdišča sarkofagov, Suti-van, Brač.

Apliciramo lahko t. i. paradigmo gradnje in izbire modelov (angl. *recover-and-select* paradigm), ki skuša odgovoriti na naslednja vprašanja:

1. Kako lahko najdemo elemente slike, ki pripadajo enemu parametričnemu modelu in hkrati določimo vrednosti parametrov tega modela?
2. Kako lahko dosežemo čim višjo odpornost na osamelce (angl. outliers)?
3. Kako najdemo začetno množico točk oz. seme (angl. seed), tako da pripada enemu parametričnemu modelu in zanemarja visok delež šuma?
4. Kako preprečimo, da začetni in vmesni rezultati enega dela ovirajo razvoj rekonstrukcije drugih modelov?

Paradigmo sestavljata dve prepleteni fazi: gradnja modelov in izbira modelov. V fazi pridobivanja se na podlagi semen v sliki inicializira iskanje parametričnih modelov, tako da posamezni modeli iterativno rastejo istočasno. Glavna prednost pristopa je, da lahko ves čas nadzorujemo uspešnost uje-manja modela s podatki. Pridobljene modele obravnavamo kot hipoteze, ki bi lahko ustrezale končnim modelom. Zato v fazi izbire ohranimo le tiste modele, ki opisujejo najenostavnejši opis prostora, torej najmanjše število modelov s čim nižjo deviacijo med točkami v prostoru in izbranimi modeli.

Med rekonstrukcijo tako po fazi pridobivanja poženemo fazo selekcije in ponavljamo oba koraka, dokler modeli niso popolnoma rekonstruirani.

Poglavje 6

Računalniška podpora in izzivi

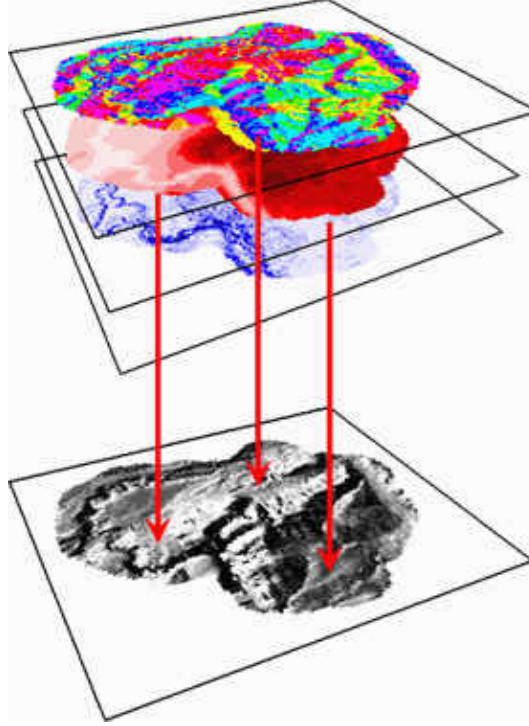
Znanje o 3D modeliranju je tradicionalno vedno bilo v domeni računalniške grafike. Področje je dobro raziskano, saj dobro razumemo temelje dinamičnih in statičnih oblik, poznamo pa tudi veliko dobrih algoritmičnih rešitev. Poraja pa se vprašanje, če bo to znanje o 3D modelih zadostovalo potrebam nove generacije uporabnikov [6].

V nadaljevanju bomo predstavili različne oblike računalniške podpore in vpeljave rezultatov 3D dokumentacije v arheologiji in kulturni dediščini, predstavili pa bomo tudi izzive, kjer bi lahko s pomočjo algoritmov olajšali delo strokovnjakov na področju modeliranja in nadaljnje analize.

6.1 Geografski informacijski sistemi

Geografski informacijski sistem je računalniški sistem za zajem, shranjevanje, pridobitev, analizo in prikaz prostorskih podatkov [52]. Združuje kartografijo, statistično analizo in tehnologijo podatkovnih baz. Geopodatki so tematski in poleg klasifikacije in umestitve v prostor vsebujejo attribute za opis lastnosti. Pogosto so pomembne tudi relacije med podatki, npr. kdo je lastnik kakšnega katastra. Objekte opisujemo z geometrijskim modelom, ki je lahko rasterski ali vektorski.

Rasterski model na vsaki koordinati vsebuje numerično vrednost, ki je



Slika 6.1: Shema zlaganja kart v sloje za izvajanje operacij kartne algebre nad posameznimi celicami. Vir: [72].

neposredno povezana z neko lastnostjo modela. Ključna informacija pri rasterskih modelih je velikost celice oz. piksla, ki jo imenujemo resolucija. Nad rasterskim modelom lahko izvajamo t. i. kartno algebro (angl. map algebra), kjer različne karte združujemo skupaj kot sloje enega nad drugim in nato nekako združimo vrednosti vsake celice, ki se prekriva (slika 6.1). Rasterske slike si lahko predstavljamo tudi kot matrike, nad katerimi izvajamo operacije linearne algebre (npr. konjunkcija v enačbi 6.1).

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

Vektorski modeli uporabljajo geometrijske primitive (točke, črte in poligone) za predstavitev prostorskih podatkov. Izvajanje operacij je bolj za-

pleteno kot pri rasterskih modelih, vendar večina orodij podpira izvajanje najpogostejših operacij, npr. izravnavanje, pokrivanje in geostatistiko.

Za predstavitev 3D podatkov obstaja več možnosti. Najenostavnejša so t. i. rasterske 2.5D slike, kjer vsak piksel predstavlja višino objekta. Največja ovira takšne predstavitve je nezmožnost opisa več višin. Tako ne moremo prikazati vertikalnih objektov, kot so zidovi ali pa notranjih prostorov, npr. podzemne jame ipd.

Druga možnost je uporaba vokslov, kjer vsak voksel predstavlja najmanjšo enoto prostora. Tako kot rasterski modeli lahko vsebuje neko numerično vrednost, ki neposredno predstavlja eno od njegovih lastnosti (npr. številka katastra) ali pa referenco na nek eksterni objekt.

Vektorski model ponuja več svobode pri opisovanju dimenzij, saj lahko za neko koordinato x in y shranimo več različnih vrednosti z . Prav tako lahko predstavimo tudi čas kot četrto dimenzijo, ki je npr. s stališča arheologije in varstva kulturne dediščine eden od ključnih parametrov za analizo.

6.2 Kiberarheologija in navidezna resničnost

Virtualna arheologija [52] je proces komunikacije in interpretacije preteklosti, kjer je rezultat statičen fotorealističen model, prikazan na velikem zaslonu ali kot video. Za razliko od virtualne resničnosti ne omogoča nobene interaktivnosti in je pogosto le rekonstrukcija nekega realnega okolja, narejena s pomočjo digitalizacije analognih dokumentov (karte, skice, knjige ...). Delovni tok deluje po pristopu *od zgoraj navzdol* in ga lahko opišemo z (1) zajemom analognih podatkov, (2) procesiranjem podatkov, (3) digitalizacijo iz analognih virov ter (4) priprava statičnega 3D rezultata.

Kiberarheologija (angl. *cyberarchaeology*) ne digitalizira ali obdeluje analognih podatkov, temveč dokumente, ko so v osnovi že digitalni: rezultati laserskih merilnikov, daljinskega zaznavanja, digitalne fotogrametrije, računalniškega videa idr., nastajajo pa med samim procesom 3D dokumentacije. Delovni tok deluje po pristopu *od spodaj navzgor*, saj na podlagi že na-

rejene dokumentacije in digitalnega gradiva ustvarimo navidezno resničnost (angl. virtual reality, VR) in interaktivno okolje, ki omogoča obojestransko interakcijo med uporabnikom in digitalnem okoljem.

6.2.1 Virtualni muzeji

Virtualni muzej je kolekcija digitalnih fotografij, zvočnih datotek, 3D modelov, tekstovnih in drugih dokumentov, ki so zaradi historičnega, znanstvenega ali kulturnega interesa dostopni [52] preko elektronskega medija. Virtualni in tradicionalni muzeji se razlikujejo predvsem po načinu, kako sporočajo vsebino, vendar so ključne lastnosti še vedno skupnem obema:

1. institucija, ki muzej upravlja in financira,
2. kolekcije sestavlja dediščina,
3. je komunikacijski sistem,
4. je dostopen širši publiki,
5. sledi nekemu interesu (izobraževanje, raziskovanje, zabava ...).

Virtualne muzeje lahko kategoriziramo v štiri večje skupine: (1) spletno dostopni, kjer je skozi brskalnik mogoče vstopiti v virtualno okolje in upravljati kompleksne scene (npr. *Aquae Patavinae VR*), (2) dostopni v muzejih, najpogosteje so to multimedijske sobe znotraj tradicionalnega muzeja, npr. *Scovergini Chapel* v muzeju *Eremitani* v Padovi (Italija), kjer se lahko gost virtualno sprehaja po 3D rekonstrukciji kapele, (3) mobilni muzeji, ki so dostopni na mobilnih napravah, npr. *Matera: tales of a city*, (4) neinteraktivni, torej večji 3D modeli, pridobljeni z digitalnimi merilniki ali pa rekonstruirani s pomočjo programov, kot so Blender (primer je virtualni muzej *Apa*, ki prikazuje Bologno v Italiji v različnih zgodovinskih obdobjih).

V Sloveniji je Laboratorij za računalniški vid Fakultete za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani že v začetku leta 1995 sodeloval pri pripravi Slovenske virtualne galerije (SVG) ter pri različnih virtualnih razstavah in medijskih inštalacijah: ROTAS–TENET, Netropolis–Cyborg’s Eye,

Netropolis–Clavis Urbis, 15 sekund slave, Pametni zid, Virtualno smučanje in Virtualen ples [64].

6.3 Iskanje oblik in klasifikacija

Metode avtomatskega iskanja oblik v 2D in tudi 3D slikah so že dalj časa prisotne, vendar so običajno prilagojene specifičnemu problemu in jih ne moremo posplošiti na kakršno koli obliko. Namen teh metod je zmanjšati čas ročnega urejanja ogromnih količin podatkov, npr. serije aerofotografij.

Primer iskanja po aerofotografijah je avtomatsko lociranje grobov [7], kjer algoritmično identificirajo grobove v naslednjih korakih:

1. določanje deskriptorjev na manjših območjih fotografij s 32-dimenzionalnimi skalarnimi vektorji, ki karakterizirajo distribucijo orientacije gradientov,
2. ustvarjanje slovarja *vizualnih besed* (angl. visual words), ki predstavljajo skupino podobnih izračunanih deskriptorjev na podlagi klasifikacije naključnih gozdov (angl. random forest),
3. priprava histograma distribucije vizualnih besed na aerofotografijah,
4. priprava linearnega klasifikatorja iz pridobljenih histogramov.

V fazi testiranja se izvedeta prvi in tretji korak, četrti pa je zamenjan s predikcijo, če se na lokaciji nahaja grob.

Podobna aplikacija je iskanje ujemanja fresk [73], kjer Tolen-Franklin et al. poleg značilk, ki jih je mogoče pridobiti iz fotografij (robovi in barve), uporabljale karte normal (angl. normal maps), pridobljenih iz 3D modelov.

Oblike lahko iščemo tudi za namen kategorizacije posameznih objektov. Primer so portretne skulpture cesarja Avgusta, katerih obraz so Lu et al. [40] razdelili na 12 regij, izračunali distančne tenzorje in jih primerjali s prilagojeno evklidsko razdaljo, ki upošteva prostorske relacije med tenzorji. Rezultate so primerjali s preteklimi arheološkimi raziskavami in ugotovili precejšnje ujemanje skupin.

6.4 Avtomatska pridobitev informacij o obliki

Prednost nekaterih volumetričnih 3D modelov je v tem, da je določene informacije o dimenzijah, površini in volumnu mogoče pridobiti avtomatsko. Ker pa najpogosteje iz različnih razlogov ne obdelujemo volumetričnih modelov, želimo taiste informacije pridobiti iz navadnih 3D mrež ali oblakov točk.

Ključen izziv pri tem je pozicioniranje 3D modela, da lahko takšne podatke izmerimo. V primeru kamnitih predmetov so Grosman et al. [22] na podlagi pozicije normal določili glavno simetrijsko ravnino in njen pravokotni presek. Njihova metoda vedno vrača enake rezultate, izmerjene dimenzije pa so natančnejše od ročnih meritev, ki so nastale v prvotni dokumentaciji objektov. Lastnosti, ki so jih lahko avtomatsko izmerili, so (1) dolžina, (2) širina (celotna, širina na polovici objekta, na četrtini ...), (3) masna točka, (4) volumen in (5) površina.

6.5 Arheološke skice

Tradicionalna dokumentacija je še vedno standardni postopek arheološke dokumentacije, ne glede na razvoj 3D dokumentacije. Če želimo počasi popolnoma zamenjati tradicionalne metode z novjšimi, moramo poskrbeti, da novejša metode proizvedejo isto obliko rezultatov.

Eden takšnih pomembnih rezultatov so tradicionalne skice, ki večinoma poudarjajo v nekem kontekstu pomembne poteze objekta in hkrati zanemarijajo manj pomembne. Gilboa et al. [21] so pripravili avtomatske metode za generiranje arheoloških skic iz 3D modelov na podlagi barvanja modelov, detekcije robov in ekstrakcije reliefov. Rezultat je viden na sliki 6.2, orodje D.o.R.¹ za ustvarjanje skic pa je prosto dostopno na spletu.

¹<http://webee.technion.ac.il/cgm/Computer-Graphics-Multimedia/Software/EdgeDetection/EdgeDetection.html>



Slika 6.2: Levo digitalna fotografija, na sredini tradicionalna skica in na desni avtomatsko pripravljena skica [21].

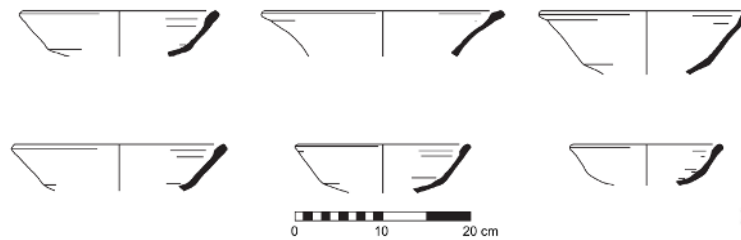
6.6 Arheološka rekonstrukcija

Pojem arheološka rekonstrukcija je veliko širši od 3D rekonstrukcije, ki iz dobljenih surovih podatkov (meritve 3D merilnikov, fotografije) sestavi 3D model. Vključuje še druge komponente, kot so kontekst, okolje, čas, poleg tega pa želi prikazati objekt v svoji prvotni obliki, četudi je mogoče zaradi časovnega in okoljskega faktorja poškodovan. Primer je rekonstrukcija celotne keramične posode iz najdenih koščkov te posode.

Huang et al. [26] so predstavili metodo, ki izključno na podlagi morfoloških lastnosti rekonstruira prvotni objekt iz 3D modelov koščkov. Algoritem identificira površine, ki so nastale zaradi razbitja, in nato z robustno globalno registracijo išče in združuje pare, hkrati pa z omejeno lokalno registracijo zлага sestavljene fragmente skupaj.

6.7 Analiza lončene posode

Računalniška obdelava 3D modelov pa je pri obravnavi kulturne dediščine že nekaj časa prisotna za specifične probleme, npr. analizo lončenih posod [32]. Na podlagi morfoloških značilnosti so lahko Karasik et al. hkrati primerjali 1000 lončenih posod. Profile teh posod lahko izvozijo v obliki, ki trenutno



Slika 6.3: Avtomatsko generirana skica lončene posode. Vir: [32].

služi kot standardno gradivo (primer avtomatsko generiranega gradiva vidimo na sliki 6.3).

6.8 Izzivi semantične analize

Pri semantični analizi se osredotočamo na pomen oz. funkcionalnost posameznih objektov ali pa predelov objektov [6]. Semantični opis nekega 3D objekta lahko razumemo kot opis objekta v kontekstu domene, ki jo obravnavamo. Semantična anotacija 3D objektov ne more biti popolnoma avtomatska in potrebuje človeško podporo. Za semantično analizo je potrebno rešiti dva ključna problema: (1) Kako pridobiti semantične informacije direktno iz geometrije? (2) Kako modelirati semantično informacijo in jo shraniti v formatu, razumljivem računalniku?

Identificiramo pa lahko štiri ključne raziskovalne izzive na področju semantične analize: (1) izpeljava simboličnih predstavitev (angl. *derive symbolic representations*), (2) ciljno orientirano sintetiziranje 3D modelov (angl. *goal-oriented 3D model synthesising*), (3) dokumentacija 3D življenjskega kroga (angl. *documenting the 3D life cycle*) in (4) semantična vizualizacija in interakcija (angl. *semantic visualisation and interaction*).

6.8.1 Izpeljava simboličnih predstavitev

Pri simbolični predstavitvi 3D modela imamo v mislih poleg geometrije tudi lastnosti in strukturo objekta v kontekstu neke domene. Pri zajemu poda-

tkov opazovalec ve, kakšen objekt meri, vendar je rezultat meritve ogromna količina surovih podatkov (npr. oblak točk), iz katerih lahko še posredno izračunamo geometrijske in topološke lastnosti. Velik problem so tudi manjkajoči podatki, ki jih pri zajemu izpustimo ali pa zaradi okoljskih faktorjev niso pravilno zajeti. Pri dediščini bi lahko uporabljali algoritme s predznajem, ki bi znali pri rekonstrukciji aplicirati simetrijo, znanje o mejah ali znanje o podobnih strukturah, da bi dobili popoln 3D model.

Ko pridobimo ustrezno rekonstrukcijo, bi morali avtomatsko prepoznati najpomembnejše lastnosti objekta in strukturirati model na podlagi njih. Nato bi sledila segmentacija, da identificiramo posamezne predele ali regije nekega objekta. Ustrezna alternativa segmentaciji je lahko tudi prilagajanje točk parametričnim modelom. Ključna naloga teh postopkov je identificirati posamezne predele, da se lahko nato kasneje analizirajo relacije med njimi.

Takšne postopke že uporabljamo v biofiziki [6], kjer na podlagi X-ray kristalografije, nuklearne magnetne resonance ali mikroskopov Cyro-EM dobijo surove podatke o geometrijski strukturi proteinov, ki jih je nato potrebno modelirati v smiselno strukturo.

6.8.2 Ciljno orientirano sintetiziranje 3D modelov

Oblika objektov je pogosto v neposredni povezavi s funkcijo, ki jo objekt uporablja. Rekonstrukcijo, kjer sintetiziramo 3D model na podlagi funkcije, ki jo opravlja, imenujemo ciljno orientirano sintetiziranje 3D modelov.

Princip se že nekaj časa uporablja pri CAD oblikovanju, saj v strojni industriji vsak posamezen gradnik služi neki specifični funkciji. Bistvena razlika je le, da pri CAD oblikovanju te gradnike oblikujemo sami, v drugih panogah pa bi jih morali rekonstruirati.

6.8.3 Dokumentacija 3D življenjskega kroga

Pri arheološki dokumentaciji nastaja poleg izmerjenega gradiva (3D zajem, fotografije, geolokacija, meritve dimenzij ...) tudi ogromno drugih informacij,

ki jih za rekonstrukcijo ne potrebujemo, so pa lahko ključne pri nadaljnji obravnavi. Zato se pojavi potreba po informiranju 3D modelov, kjer bi lahko z navadnimi tekstovnimi komentarji, dodatnimi fotografijami podrobnosti ali drugimi komplementarnimi informacijami obogatili celoten 3D model kot tudi posamezne predele. To informacijo lahko imenujemo tudi semantična anotacija, saj je v nekem kontekstu relevantna objektu, vendar ni eksplicitno ali implicitno povezana z njegovo obliko.

V kulturni dediščini so ti metapodatki lahko material, barva, konservacijsko stanje in okoljske spremenljivke (geolokacija, način 3D zajema objekta ...), ki jih sami enkodiramo v model, poleg njih pa tudi avtomatski izračuni orodij, kot so dimenzije, vrsta oblike, in druge strukturne lastnosti.

Čeprav že obstajajo orodja, ki nam omogočajo nekatere od teh anotacij, je ključen izziv tega področja standardizacija takšne vsebine.

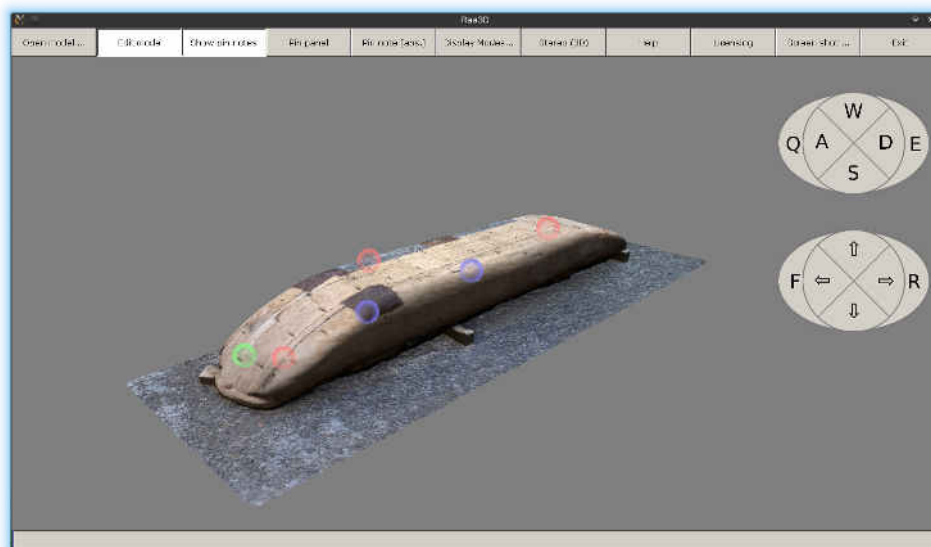
6.8.4 Semantična vizualizacija in interakcija

Semantično vizualizacijo in interakcijo razumemo kot množico procesov, ki kontrolirajo način predstavitve 3D modela končnemu uporabniku in kako ga uporabnik prejme, išče, pridobiva in raziskuje. Takšna orodja morajo omogočati:

1. prikaz kompleksnih oblik na podlagi semantičnih kriterijev,
2. pripravljane fleksibilnih poizvedb za semantično iskanje,
3. obogateno 3D prezentacija s semantičnimi anotacijami (tekstovni komentarji ali dokumenti, fotografije, video, drugi 3D modeli idr.).

Primer enostavnega orodja je tudi Raa3D [68], ki z barvnimi mehurčki označuje informirane točke na 3D modelu in omogoča vstavljanje informacij kot so tekstovni zapisi, geolokacija in dodatne fotografije detajlov. Primer lahko vidimo na sliki 6.4.

Izzivov na tem področju je več, eden ključnih je optimizacija prikazovanja 3D modelov. Prva komponenta je iskanje zornega kota, ki lahko smiselno



Slika 6.4: Orodje Raa3D, kjer je 3D model mogoče obogatiti s tekstovnimi ali slikovnimi informacijami.

prikaže največ semantičnih informacij. Druga komponenta je semantično zumiranje (angl. semantic zoom), kjer pri zumiranju navzven namesto pomajššan model vidimo kakšno drugo smiselno predstavitev objekta, pri zumiranju navznoter pa podrobnejše informacije, ki mogoče tudi niso neposredno povezane z obliko. Zadnja komponenta pa je semantična interakcija, ki poleg upravljanja prikazovanja modela omogoča tudi iskanje na podlagi vsebine (angl. content-based search) in na podlagi konteksta (angl. context-based search).

6.9 Iskanje po podatkovni bazi 3D modelov

Učinkovito indeksiranje 3D modelov in njihovih semantičnih informacij je eden od večjih izzivov za računalniško podporo. Podatkovne zbirke lahko omogočajo poleg poizvedovanja po modelih tudi širšo kategorizacijo različnih modelov, izgradnjo zbirke različnih semantičnih metapodatkov in posledično

nekoč tudi klasifikacijo 3D modelov [65].

Za učinkovito iskanje moramo 3D modele znati ustrezno indeksirati. Ustvarimo lahko različne indekse za različne poizvedbe [19], npr.:

1. tekstovni indeks ključnih besed,
2. 2D indeks za iskanje ujemanja 3D modelov z 2D slikami, npr. skicami,
3. 3D indeks za iskanje ujemanja podanega 3D modela z drugimi, torej za iskanje podobnih 3D oblik.

6.10 Drugi izzivi

Poleg semantičnih izzivov in izzivov pri iskanju po 3D modelih je še nekaj manj izrazitih nerešenih vprašanj, ki prav tako ovirajo razvoj računalniške podpore dokumentacijskim procesom.

Ker poznamo več različnih oblik predstavitve 3D podatkov, ki smo jih opisali v poglavju 4, moramo dobro poznati taksonomijo in pogoje, v katerih so določene oblike uporabne, prav tako pa moramo znati odgovoriti, *kdaž dva 3D modela predstavljati isti objekt* [24], čeprav z drugo obliko predstavitve, npr. površinsko in volumetrično. Neodvisna od oblike predstavitve 3D informacij mora biti tudi *semantična anotacija 3D modelov*, posledično pa tudi poizvedovanje in urejanje anotacije.

Pomembna je tudi *standardizacija datotečnega formata*, ki ga uporabljamo za arhiviranje ali pa deljenje 3D modelov drugim. Problem pri različnih formatih je izguba informacij, ko pretvarjamo med pridobljenim in pa končnim formatom, ki ga prepozna naše orodje.

Določiti pa moramo še skupen oz. standardiziran *format za opis konteksta*, iz katerega je dobljen nek 3D model, torej v kakšni obliki posredovati vse ostale informacije iz arheološke dokumentacije, ki so bistvene za razumevanje opazovanega objekta.

Poglavje 7

Metode

V okviru magistrske naloge smo iz testnih 3D modelov, pridobljenih s pomočjo fotogrametrije ali pa prenesenih iz spleta, rekonstruirali običajne in deformirane superelipsoide. V nadaljevanju sledi opis omenjenih modelov, postopkov in pripravljenega programskega okolja.

7.1 Programsko okolje

Za implementacijo lastne metode deformacije smo izbrali odprtokodno programsko okolje Meshlab. Vanj smo kot razširitev vključili predelani program QtSegmentor za segmentacijo in gradnjo superelipsoidov iz trikotniških mrež kot dodatek (angl. plugin). V nadaljevanju bomo pisali več o okoljih Meshlab, Segmentor in QtSegmentor, o postopku prenove QtSegmentorja v knjižnico in o dodatnih funkcionalnostih, ki smo jih vključili v okviru magistrskega dela.

7.1.1 Meshlab

Meshlab [8] je odprtokodna programska oprema za modeliranje in urejanje 3D modelov, ki ponuja veliko zmogljivih specifičnih funkcionalnosti, ki so redko dostopne brezplačno. Pomembna lastnost Meshlaba je razširljiva arhitektura, saj je večina funkcionalnosti izdelanih kot vtičnik programu, jedro programa

pa s pomočjo knjižnice VCG (angl. Visual Computing Library) rešuje izzive v zvezi s podatkovno strukturo, njeno obdelavo in vizualizacijo. Izvorna koda je napisana v programskem jeziku C++ v grafičnem okolju Qt4.

Poslanstvo programa Meshlab je v

- enostavnosti uporabe vsaj za najosnovnejše funkcionalnosti,
- naprednih funkcionalnostih za zahtevnejše uporabnike,
- fokusu v procesiranju modela namesto njegovem urejanju, kar omogoča mnogo drugih specializiranih orodij Blender, Maya, 3D Max in druga,
- učinkovitosti pri procesiranju modelov, sestavljenih iz več milijonov trikotnikov ter
- trajnosti in sledenju najsodobnejšim metodam procesiranja mrež.

Meshlab nima obsežne dokumentacije, ima pa vgrajeno pomoč ter ogromno videoposnetkov na spletni storitvi YouTube, ki opisujejo najpogostejše postopke obdelave 3D, kot so transformacije, rekonstrukcije in simplifikacije modelov ter meritve in analiza kvalitete.

Najpomembnejše funkcionalnosti Meshlaba so:

- vmesnik za selekcijo in brisanje območij na modelu,
- vmesnik za barvanje, glajenje modela,
- uvoz in izvoz v ogromno število različnih datotečnih formatov, kot so PLY, STL, OFF, OBJ, 3DS, COLLADA, PTX, X3D, VRML idr.,
- filtri za čiščenje modelov (odstranjevanje dupliciranih oglišč, praznih površin in majhnih izoliranih območij,
- simplifikacija modelov,
- rekonstrukcija površin,
- filtri za vizualno analizo modela,

- orodje za meritve,
- orodje za izrezovanje ploskev v formatu SVG,
- poravnava in združevanje več modelov skupaj.

Razširljiva arhitektura Meshlaba omogoče tri vrste vtičnikov: (1) *filtre* (angl. filter plugins) za obdelavo mrež, (2) *vhodno-izhodne operacije* (angl. i/o plugins) za uvažanje in izvažanje modelov ter (3) splošne vtičnike (angl. edit plugins), ki omogočajo zapletenejšje operacije in lastni grafični vmesnik. Obsežne dokumentacije za uporabo in izdelavo vtičnikov ni, vendar lahko ta pravila razberemo iz ostalih že narejen vtičnikov. Ker je Meshlab izdelan v grafičnem okolju Qt4, je izdelava grafičnih vmesnikov poenostavljena, prav tako pa okolje Qt4 ponuja vrsto pripomočkov za hitrejše programiranje v programskem jeziku *C++*.

Uporaba programa Meshlab se je razširila med arheologi in strokovnjaki za ohranjanje kulturne dediščine.

7.1.2 Segmentor

Segmentor [29] je program, ki na podlagi paradigme gradnje in izbire segmentira globinske slike, rezultat programa pa je parametrični model superelipsoida.

S Segmentorjem po globinski sliki najprej porazdelimo semena superelipsoidov okoli naključno izbranih regij točk. Nato postopoma vključujemo večje regije točk in prilagajamo parametre superelipsoida, da model čimbolj ustreza vhodni globinski sliki. Ko je napaka prevelika ali zmanjka točk za rast, je proces končan.

Težava Segmentorja je v zastarelem grafičnem vmesniku, nerazumevanju oblakov točk ali trikotniških mrež ter lastnem formatu vhodnih podatkov.

7.1.3 QtSegmentor

QtSegmentor je nadgradnja programa Segmentor z novejšim uporabniškim vmesnikom in podporo za segmentacijo trikotniških mrež [34]. Poleg superelipsoidov omogoča parametrično gradnjo ploskev ter drugih volumetričnih modelov, kot so sfere, torusi, cilindri, stožci in ploskve drugega reda.

Poleg gradnje modelov omogoča funkcionalnost selekcije modelov, ki odstrani vse redundantne modele, ki imajo večjo napako in so njihova območja točk že vključena v druge modele.

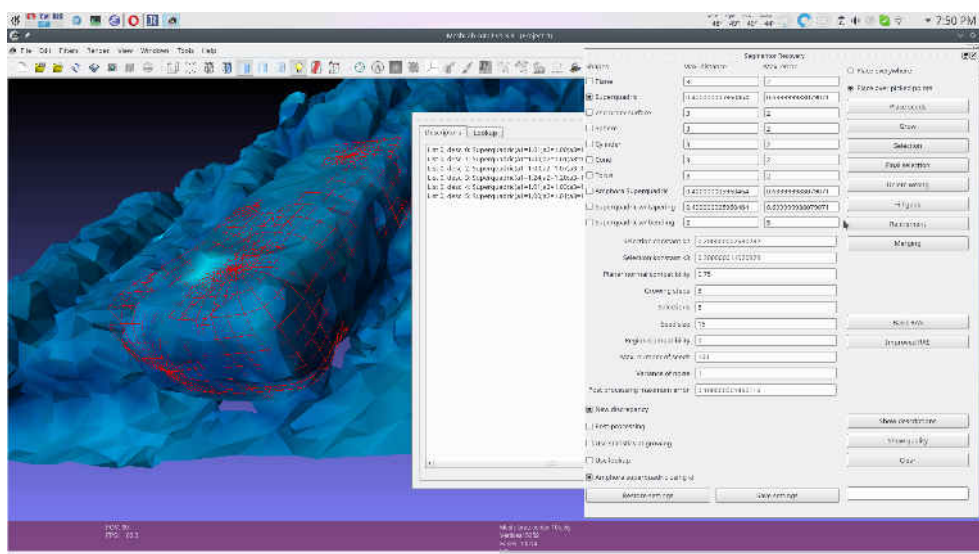
Ključen pojem pri gradnji modela je sosesčina točk. V primeru globinskih slik je definicija enostavna, saj sta točki, ki imata razdaljo v 2D prostoru slike enako 1, sosednji. V primeru trikotniških mrež pa pojem razširimo v 3D prostor, kjer si sosednji točki morata deliti rob oz. točki sta si sosednji, če sestavljata isti trikotnik.

QtSegmentor gradi in izbira modele v treh korakih:

1. določanje semen,
2. gradnja in izbira modelov ter
3. selekcija najustreznejših modelov.

Algoritem v prvem koraku poseje semena modelov. Sledi gradnja v več korakih (število korakov lahko nastavimo), nato pa selekcija ustreznih modelov. Če obstajajo modeli, ki še vedno lahko rastejo, se koraka 2 in 3 ponavljata, dokler skupna napaka ni prevelika oz. ni več sosednjih točk, ki bi jih lahko vključili v območje modela.

QtSegmentor reši večino zgoraj naštetih problemov Segmentorja, vendar uporablja lasten format vhodnih podatkov, vizualizacija modela je toga in počasna, izdelan pa je s pomočjo zastarelih računalniških knjižnic, npr. s pomočjo grafičnega okolja Qt3.



Slika 7.1: Vtičnik Segmentor v okolju Meshlab.

7.1.4 MeshSegmentor v okolju Meshlab

QtSegmentor za sodobne oblake točk in trikotniške mreže, sestavljene iz več milijonov točk, ni primeren, implementacija lastnega okolja za zmogljivo urejanje takšnih modelov pa bi vzela ogromno časa, prav tako pa bi lahko bila kakovost v primerjavi z preverjenimi orodji vprašljiva. Zato smo se odločili prepisati QtSegmentor v knjižnico, imenovano *libsegmentor* in jo vključiti v okolje Meshlab kot vtičnik MeshSegmentor. Tako imamo na voljo vse funkcionalnosti Meshlaba, knjižnico *libsegmentor* pa lahko potencialno vključujemo tudi v druga okolja.

Uporabniški vmesnik MeshSegmentorja smo pripravili v okolju Qt4 s programom QtDesigner. Odločili smo se za izdelavo splošnega vtičnika, pomagali pa smo si s primerom vtičnika *sampleedit*, ki smo ga našli v izvorni kodi Meshlaba.

QtSegmentor smo predelali v knjižnico *libsegmentor* tako, da smo odstranili vse odvisnosti od zunanjih knjižnic (najpogostejše knjižnica Qt3) in pripravili vmesnike za komunikacijo (angl. interface) z odjemalcem (v našem primeru Meshlab):

- nastavitve z vmesnikom *RecoverySettings* (napake in največje razdalje volumetričnih modelov, parametri selekcije, velikost semen idr.),
- podatkovna struktura z vmesnikom *MeshModel* (preslikava drugih podatkovnih struktur, npr. Meshlabove, v podatkovno strukturo Segmentorja),
- sporočanje z vmesnikom *Messaging* (sporočanje vmesnih rezultatov in sporočil za uporabnika iz knjižnice v odjemalca),
- informacija o poteku z vmesnikom *ProgressIndicator* in
- izrisovanje z vmesnikom *Drawer*.

Vtičnik tako redefinira vmesnike z razredi, v katerih lahko uporablja vse funkcionalnosti izvirnega okolja.

Vtičnik Segmentor poleg najpomembnejših funkcionalnosti QtSegmentorja omogoča:

- izbiro točk, okoli katerih *libsegmentor* ustvari začetna semena,
- modele ošiljenih in valovitih superelipsoidov,
- primitivno iskanje podobnih oblik ter
- izvoz in uvoz parametričnih modelov.

Uvoženi parametrični modeli so primerni le za vizualizacijo, saj z izvozom izgubimo podatke o točkah, ki so v regiji parametričnega modela.

Zaradi nepopolne dokumentacije smo veliko težav pri implementaciji reševali s študiranjem izvirne kode drugih vtičnikov. Eden večjih izzivov je bilo ravno izrisovanje, rešili pa smo ga z direktno komunikacijo z grafično 3D knjižnico OpenGL. Srečali smo se tudi z specifikami različnih grafičnih gonilnikov. Ker nam gonilniki Intel ne omogočajo izbire točk za semena, smo vtičnik testirali izključno z grafičnimi gonilniki Nvidia.

V okviru prihodnjih izboljšav bi morali določene dele *libsegmentorja* prenoviti (zastareli C++ koncepti ipd.), poskrbeti za implementacijo vseh funkcionalnosti QtSegmentorja ter optimizirati izrisovanje volumetričnih modelov. Poleg parametrov modelov bi lahko omogočili izvoz regij točk, tako da bi po uvozu lahko nadaljevali s segmentacijo in rekonstrukcijo. Premislili bi lahko tudi o interni podatkovni strukturi, saj trenutno kopiramo podatke o točkah iz Meshlaba v *libsegmentor*, namesto da bi s pametnejšim referenčiranjem uporabljali iste podatke.

Izvorno kodo *libsegmentorja* in vtičnika *Segmentor* najdemo na naslovu: <https://github.com/ddksr/segmentor-meshlab>.

7.2 Priprava fotogrametričnih 3D modelov

Za testiranje rekonstrukcije superelipsoidov smo se odločili uporabiti že obstoječe 3D modele arheoloških najdišč (1) Sutivan (najdišče sarkofagov) za primerjavo izračunanih dimenzij superelipsoidov z ročno izmerjenimi iz 3D modela in (2) Karlovac (najdišče zidakov) za preizkus primitivnega iskanja superelipsoidov. Poleg modelov najdišč smo na spletu poiskali 3D modele amfor za testiranje rekonstrukcije deformiranih superelipsoidov. Superelipsoide pa smo rekonstruirali iz 3D modela, kjer smo preizkusili arheološko 3D dokumentacijo od zajema fotografij do rekonstrukcije s fotogrametrijo (tempelj Neptun).

7.2.1 Brodolom Sutivan

Rimski brodolom [45] v bližini kraja Sutivan na otoku Brač, Hrvaška, je najdišče sarkofagov s pokrovi, grobo pripravljenimi nagrobnimi kamni in kamnitim dolijem (posoda za shranjevanje olje). Nahaja se na globini 32 m na površini skoraj 40 m². Na podlagi 900 fotografij, ki jih je posnel Rok Kovačič, smo z orodjem PHOV Mementify zgradili fotogrametričen 3D model najdišča (slika 7.2).

Na podlagi najdb št. 3 (velikosti 200×92×72 cm) in št 5. (velikosti



Slika 7.2: 3D model brodoloma s sarkofagi v bližini kraja Sutivan.

215×107 cm) smo določili faktor skaliranja 1 : 34,07, na podlagi katerega smo 3D model transformirali v realno velikost. Opazovanim najdbam smo v Meshlabu ponovno izmerili dimenzije, nato pa smo izračunali povprečno napako in standardni odklon med izmerjeno dimenzijo in preračunano dimenzijo rekonstruiranega superelipsoida. Rezultate 3D obdelave tega najdišča smo že objavili v reviji *Journal of Archaeological Science* [28].

7.2.2 Brodolom Kamensko

2000 let star rimski brodolom [11] v reki Kupi v bližini kraja Kamensko na Hrvaškem poleg tovarne ladje vsebuje opečne zidake enakih dimenzij, ki se zdijo primerni za rekonstrukcijo s superelipsoidi. Najdišče približne velikosti 9×2 m je potopljeno na globini 5 m. Fotografije je posnel Krunoslav Zubčić in s pomočjo programa Agisoft PhotoScan pripravil fotogrametričen 3D model, ki ga vidimo na sliki 7.3.



Slika 7.3: 3D model brodoloma z zidaki v reki Kupa na Kamenskem.



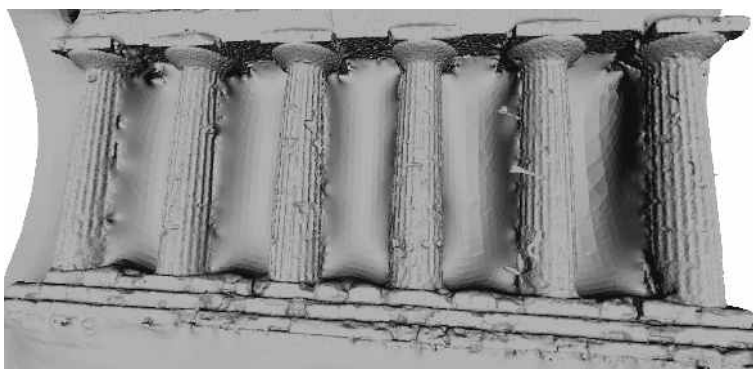
Slika 7.4: Serija fotografij za fotogrametrično obdelavo templja Neptun.

7.2.3 Tempelj Neptun

Antični grški tempelj Hera II v Paestomu, v južni Italiji, je posvečen grški boginji Heri, ženi vrhovnega boga Zeusa. Zaradi napačnega razumevanja v 18. stoletju ga še vedno imenujejo tempelj Neptun, saj so zmotno domnevali, da je posvečen Neptunu, grškemu bogu morja.

S fotoaparatom Nikon D70 smo zajeli serijo 24 fotografij na razdalji 10 metrov od templja. Vsebina fotografij se prikriva približno na 80 %, kot lahko vidimo na sliki 7.4.

Z odprtokodnim programom MicMac smo pripravili surov in neobdelan fotogrametrični model (slika 7.5).



Slika 7.5: Surov 3D model templja Neptun.

7.2.4 Primeri antičnih amfor

Spletna storitev SketchFab ¹ je namenjena objavljanju in deljenju 3D modelov na spletu. Za rekonstrukcijo deformiranih superelipsoidov smo poiskali 3D modele čimbolj različnih primerov amfor avtorjev MicroPasts, ki so bili narejeni iz ročnih skic:

1. Agora G199 ²,
2. Agora M54B ³,
3. Africana 3A ⁴.

Rekonstrukcijo smo naredili tudi iz fotogrametrično pridobljene amfore NCMA ⁵ avtorja Ryana Baumann.

Primere amfor lahko vidimo na sliki 7.6.

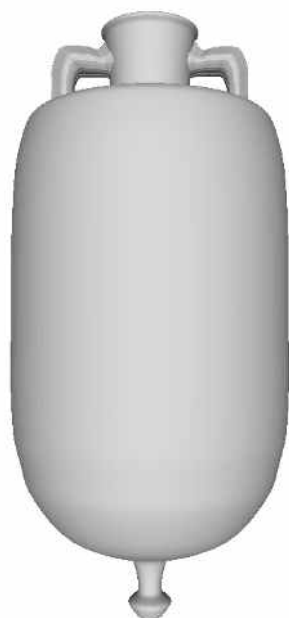
¹<https://sketchfab.com>

²<https://sketchfab.com/models/97de751bb85749e9ad710994e29bdf5a>

³<https://sketchfab.com/models/2c60fb7ca1e04933a61f578ee7a02c44>

⁴<https://sketchfab.com/models/c85c6d7906284bef91aac91124d657f4>

⁵<https://sketchfab.com/models/223134e645f948fd85c993d32e86b1ef>



(a) Agora G199



(b) Agora M54B



(c) Africana 3A



(d) NCMA

Slika 7.6: 3D modeli amfor, prenesenih s spletne storitve SketchFab.

7.3 Rekonstrukcija superelipsoidov

V nadaljevanju sledi podrobnejši opis superelipsoidov in globalnih deformacij, predstavili pa bomo tudi postopek rekonstrukcije deformiranih superelipsoidov iz poenostavljenih trikotniških mrež.

7.3.1 Poenostavitev modela v Meshlabu

Segmentor ima predvsem iz performančnih razlogov nastavljene določene omejitve, najpomembnejše so (1) maksimalno število točk, ki jih lahko vključi v območje superelipsoida ($N_{max} < 25000$) ter (2) minimalna velikost parametrov dimenzij $a_{1,2,3} \geq 1$. Predpostavili smo, da z večjo gostoto točk v regijah rezultati niso nujno boljši, zahtevajo pa dosti več procesorskega časa. Zato smo število trikotnikov v vseh testnih modelih skušali zreducirati pod 15000, določene modele pa smo morali tudi skalirati. V tabeli 7.1 smo zbrali rezultate transformacij in simplifikacij.

Modele smo poenostavili z orodjem *Kvadrčno zdesetkanje s krčenjem robov* (angl. *Quadric Edge Collapse Decimation*) iz menija *Filtri*, kategorije *Ponovna gradnja mrež, poenostavitev in rekonstrukcija* (angl. *Remeshing, Simplification and Reconstruction*). Nastavili smo ciljno število trikotnikov, ostale nastavitve pa smo pustili privzete.

Skaliranje smo opravili z orodjem *Transformacija: skaliranje* (angl. *Transform: Scale*), ki ga najdemo v meniju *Filtri*, kategoriji *Normale, krivine in orientacija* (angl. *Normals, Curvatures and Orientation*). Nastavili smo faktor skaliranja, ki mora biti enak za vse dimenzije x , y in z , ostale nastavitve pa smo pustili privzete.

7.3.2 Lastnosti superelipsoidov

Superelipsoide lahko predstavimo z implicitno ali eksplicitno enačbo, kot smo pokazali v poglavju 4.3.3. Za določanje razdalje do točke in iskanje parametrov potrebujemo tudi funkcijo ujemanja (angl. *inside-outside function*), določeno z enačbo 7.1. Če je $F(x, y, z) = 1$, točka $T(x, y, z)$ leži na

model	začetna velikost	končna velikost	skala
Neptun	514421, 1023036	2870, 5173	10
Kupa	171240, 336990	5475, 10530	1
Sutivan	1345960, 2687882	5252, 10314	10
Sutivan 3	121643, 242485	497, 942	10
Sutivan 5	126337, 251896	4020, 7829	10
Sutivan 6	25236, 50053	820, 1561	10
Sutivan 8	37845, 74800	631, 1164	10
Sutivan 9	73273, 145792	606, 1136	10
Sutivan 10	57486, 114546	470, 890	10
Sutivan 11	11678, 22949	763, 1428	10
Sutivan 13	104412, 207332	870, 1613	10
Agora G199	72896, 145602	4546, 9040	100
Agora M54B	48128, 96160	3028, 6008	100
Africana 3A	190784, 381444	2996, 5942	100
NCMA	18975, 27812	3567, 6951	1

Tabela 7.1: Število oglišč in trikotnikov pred in po simplifikaciji modela ter faktor skaliranja, kadar so območja ciljnih superelipsoidov po dimenzijah manjša od 1.

površini superelipsoida. Če je $F(x, y, z) < 1$, je znotraj superelipsoida, sicer pa zunaj.

$$F(x, y, z) = \left(\left(\frac{x}{a_1} \right)^{\frac{2}{\epsilon_2}} + \left(\frac{y}{a_2} \right)^{\frac{2}{\epsilon_2}} \right)^{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} + \left(\frac{z}{a_3} \right)^{\frac{2}{\epsilon_1}} \quad (7.1)$$

Radialna evklidska razdalja d med centrom superelipsoida s in točko $r_o = (x_0, y_0, z_0)$ je definirana z enačbo 7.2.

$$d(r_o, s) = ||r_o|| |1 - F_s^{-\frac{\epsilon_1}{2}}(x_0, y_0, z_0)| \quad (7.2)$$

Za omejitev rasti superelipsoidov med rekonstrukcijo nas zanima skupna napaka superelipsoida. To definiramo kot povprečno razdaljo med superelipsoidom s in vsako točko v množici točk R velikosti N v njegovi regiji (enačba 7.3).

$$\text{err}(R, s) = \frac{\sum_{i=0}^N d(r_i, s)}{N} \quad (7.3)$$

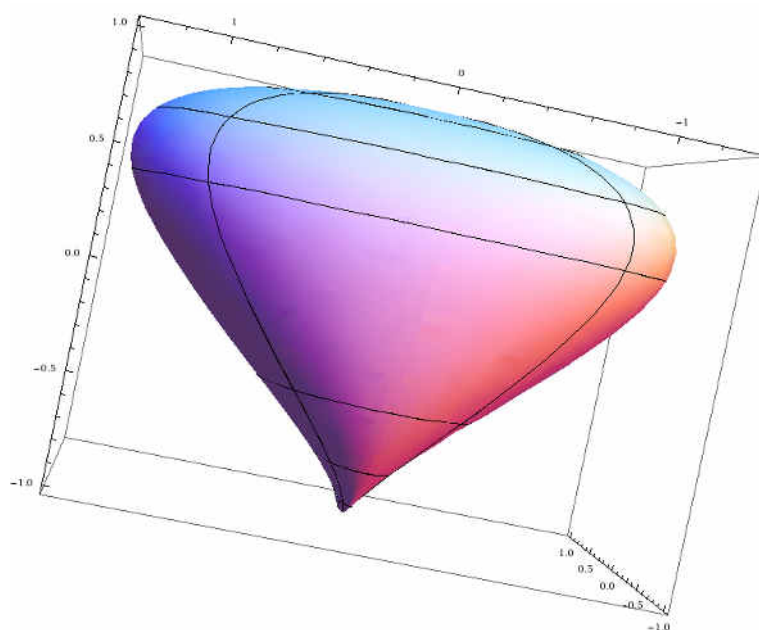
7.3.3 Globalne deformacije

Globalna deformacija je funkcija D , ki eksplicitno modificira vse točke x, y, z na površini superelipsoida (enačba 7.4).

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = D \left(\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} D_x(x, y, z) \\ D_y(x, y, z) \\ D_z(x, y, z) \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

Globalne deformacije apliciramo po translaciji in rotaciji superelipsoida. Če želimo parametre deformacije pridobiti direktno iz vhodnih točk nekega 3D modela, morajo biti deformacije definirane tako, da čim manj omejujejo lokalni koordinatni sistem superelipsoida, torej mora biti prostor rešitev okoli spremenljivih rešitev konveksen, tako da se lahko parametri superelipsoida prosto prilagajajo dejanski obliki objekta.

Definirati moramo tudi dve dodatni omejitvi, povezani z rekonstrukcijo:



Slika 7.7: Deformacija šiljenja superelipsoida s parametri $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0.9$, $K_x = 0.2$ in $K_y = 1.0$.

1. poznati moramo vse parcialne odvode funkcije deformacije po njenih parametrih na nekem opazovanem intervalu,
2. obstajati mora nevtralna vrednost parametra deformacije, pri kateri je deformirana vrednost enaka vhodni $D(x_0) = x_0$.

Šiljenje

Deformacija šiljenja oži ali širi objekt po izbrani dimenziji. Primer ošiljenega superelipsoida vidimo na sliki 7.7.

Šiljenje na podlagi koordinate z modificira koordinate x in y , kot lahko vidimo v enačbi 7.5, inverzno transformacijo pa v enačbi 7.6. Slednjo potrebujemo, ko prilagajamo model na podlagi vhodnih točk ali pa, ko računamo funkcijo ujemanja (angl. *inside-outside function*).

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x(z)x \\ f_y(z)y \\ z \end{bmatrix} \quad (7.5)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X}{f_x(z)} \\ \frac{Y}{f_y(z)} \\ Z \end{bmatrix} \quad (7.6)$$

Linearno šiljenje je definirano z enačbo 7.7 za os x in enačbo 7.8 za os y .

$$f_x(z) = \frac{K_x}{a_3}z + 1 \quad (7.7)$$

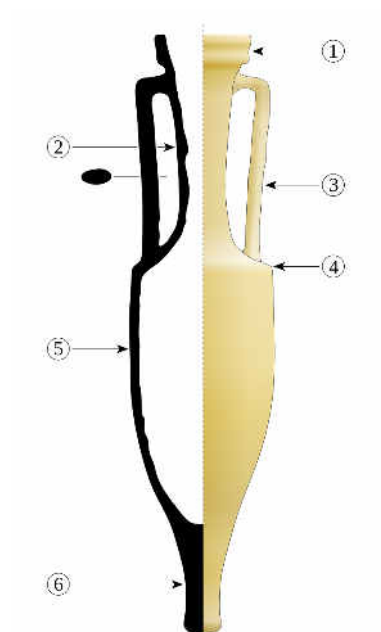
$$f_y(z) = \frac{K_y}{a_3}z + 1 \quad (7.8)$$

Funkcija linearnega šiljenja tudi zadošča pogojem za rekonstrukcijo, preslika vhodni x v samega sebe pri vrednosti 0 in vsi parcialni odvodi po parametrih β so znani.

7.3.4 Modeliranje arheoloških najdb

Čeprav za arheološko dediščino velja, da je večina predmetov unikatnih in rezultat ročnega dela, lahko za modeliranje določimo nekaj predpostavk, ki nam pomagajo najti najboljšo deformacijo superelipsoida:

1. številne najdbe so ciklično simetrični (npr. glinasta posoda zaradi lončarskega vretena) po osi z , zato lahko uporabimo deformacijo šiljenja, kjer je $K_x = K_y$,
2. najdbe imajo pogosto gladke robove ali pa rahlo valovijo, kar bi lahko predstavili s polinomi ali sinusoidami, šiljenje pa tako ni popolnoma linearno,
3. amfore in podobno posodo arheologi danes klasificirajo na podlagi morfoloških lastnosti [55], kar pomeni, da obstaja omejeno število parame-



Slika 7.8: Deli amfore, na podlagi katerih se izvaja arheološka klasifikacija: (1) obod, (2) vrat, (3) ročaj, (4) ramena, (5) telo in (6) noga ali baza. Vir: [75].

trov oblike, na podlagi katerih se prepozna vrsto in obdobje nastanka nekega predmeta (predele amfore vidimo na sliki 7.8).

V tej nalogi smo se osredotočili na modeliranje telesa amfore, saj bi iskanje deformacije za celotno amforo vpeljalo ogromno število parametrov, ki bi jih povezovala kompleksna in težko odvedljiva funkcija. Če bi želeli modelirati celotno amforo, bi jo lahko sestavili iz več superelipsoidov, deformiranih s šiljenjem in prepogibanjem.

7.3.5 Metoda simetričnega šiljenja s sinusoido

Na podlagi zgoraj naštetih predpostavk smo se odločili za deformacijo simetričnega šiljenja $f_{xy}(z) = \frac{K_{xy}}{a_3}z + 1$, ki ga želimo še dodatno modificirati z neko valovito funkcijo $f_a(z)$ (enačba 7.9).

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{xy}(z)f_a(z)x \\ f_{xy}(z)f_a(z)y \\ z \end{bmatrix} \quad (7.9)$$

Za valovito funkcijo bi lahko izbrali polinom, vendar smo se odločili za sinusoido (enačba 7.10), saj lahko tako samo s frekvenco valovanja močno vplivamo na končno obliko funkcije, pri frekvenci $K_f = 0$ pa dobimo nevtralno vrednost $h_a(x) = 1$.

Težava funkcije h_a je v periodičnih negativnih vrednostih, zato smo jo morali kvadrirati in koreniti, kot je prikazano z enačbo 7.11 (alternativa bi lahko bila uporaba absolutne vrednosti, vendar ta ni odvodljiva na celotnem opazovanem intervalu).

$$h_a(x) = \cos(K_fx) \quad (7.10)$$

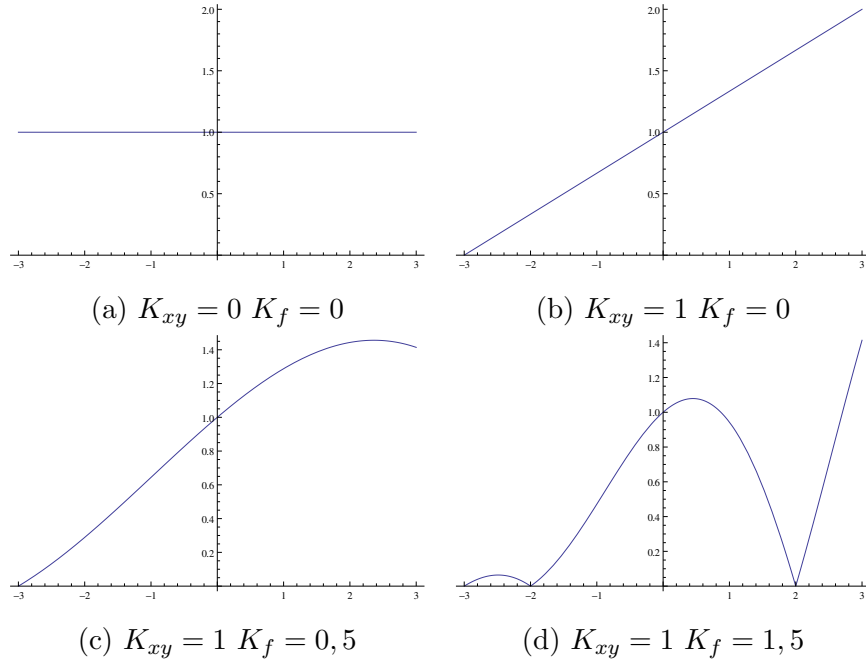
$$g_a(x) = \sqrt{h_a^2(x)} = \sqrt{\cos^2(K_fx)} \quad (7.11)$$

Za najustreznejše modificiranje superelipsoida moramo z na intervalu $[-a_3, a_3]$ preslikati na interval $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$, kot je prikazano z enačbo 7.12. Končna funkcija deformacije je prikazana z enačbo 7.13.

$$f_a(z) = g_a\left(\frac{\pi}{2} \frac{z}{a_3}\right) = \sqrt{\cos^2\left(\frac{\pi}{2} K_f \frac{z}{a_3}\right)} \quad (7.12)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{K_x}{a_3}z + 1\right) \sqrt{\cos^2\left(\frac{\pi}{2} K_f \frac{z}{a_3}\right)} x \\ \left(\frac{K_x}{a_3}z + 1\right) \sqrt{\cos^2\left(\frac{\pi}{2} K_f \frac{z}{a_3}\right)} y \\ z \end{bmatrix} \quad (7.13)$$

Slika 7.9 nam pomaga razumeti vpliv parametrov K_{xy} in K_f . Kadar sta oba enaka 0, dobimo osnovno enačbo elipsoida, kjer se vrednosti x in y ne modificirajo (slika 7.9a). Šiljenje, pri katerem $K_{xy} \neq 0$, vpliva na naklon po x in y (slika 7.9b) ter tako omogoča ošiljene oblike superelipsoida (primer na sliki 7.7. Parameter K_f lahko šiljenju omeji ostrino na robovih (slika 7.9c),

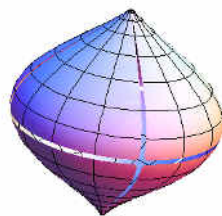
Slika 7.9: Vpliv parametrov K_{xy} in K_f na deformacijo.

lahko pa omogoči nove izbokline (slika 7.9d)), s katerimi bi potencialno lahko predstavili nogo ali vrat amfore. Žal s parametri ne moremo neposredno vplivati na širino vrata ali noge, zato bi ustrezni modeli lahko nastali zgolj slučajno.

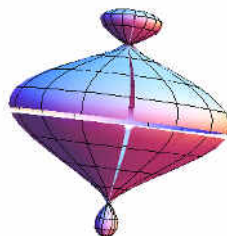
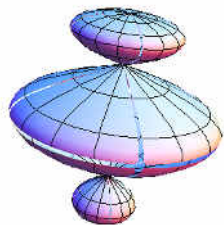
Najlažje si odražanje parametrov K_{xy} in K_f v prostoru predstavljamo s pomočjo slike 7.10. Ko je vrednost parametra $K_f < 1$, je vpliv viden zgolj kot intenziteta šiljenja na dnu ali vrhu superelipsoida (sliki 7.10a in 7.10b), kadar pa je $K_f \geq 1$, superelipsoid pridobi nove izbokline.

7.3.6 Rekonstrukcija deformiranega superelipsoida

Rekonstrukcija superelipsoida [30] poteka z iskanjem ustreznih parametrov velikosti a_1, a_2, a_3 , oblike ϵ_1, ϵ_2 , pozicije p_x, p_y, p_z in orientacije ϕ, θ, ψ v prostoru ter parametrov deformacije, v našem primeru K_x, K_y, K_{xy} in K_f . Določamo jih z metodo Levenberg–Marquardt [38, 42, 50] ali navlaženo metodo najmanjših kvadratov (angl. damped least-squares, DLS), ki je primerna za



(a) $K_{xy} = 0,2$ $K_f = 0,4$ (b) $K_{xy} = 0,2$ $K_f = 0,9$



(c) $K_{xy} = 0,3$ $K_f = 1,9$ (d) $K_{xy} = 0,5$ $K_f = 1,5$

Slika 7.10: Nekaj primerov superelipsoidov z različnimi K_{xy} in K_f .

iskanje nelinearnih najmanjših kvadratov, npr. prilagajanje točk krivuljam. Z metodo skušamo minimizirati vrednost funkcije $S(\beta)$ (enačba 7.14) za zgoraj naštet parametre β . Metoda določa vrednost parametrov s pomočjo gradienta J funkcije f (enačba 7.15) in oceno δ . Minimizirati skušamo vrednost $S(\beta) + \delta$, kot je prikazano v enačbi 7.16, s pomočjo analitično določljivih parcialnih odvodov superelipsoida.

$$S(\beta) = \sum_{i=0}^m y_i - f(x_i, \beta) \quad (7.14)$$

$$J_i = \frac{\partial f(x_i, \beta)}{\partial \beta} \quad (7.15)$$

$$S(\beta) + \delta \approx \sum_{i=0}^m y_i - f(x_i, \beta) - J_i \delta \quad (7.16)$$

V enačbi 7.18 vidimo del funkcije elipsoida, kjer po osi x apliciramo šiljenje in našo deformacijo. A je funkcija parametrov β (enačba 7.17), kjer so β' pozicijski in orientacijski parametri $\{p_x, p_y, p_z, \phi, \theta, \psi\}$. Podobno enačbo dobimo za os y , kar lahko vidimo v enačbi 7.19.

$$\beta = \{a_1, a_2, a_3, \epsilon_1, \epsilon_2, k_x, k_{xy}, k_f, \beta'\} \quad (7.17)$$

$$A(\beta) = \frac{X(\beta')}{a_1 \sqrt{\cos^2(k_f \frac{p_i}{2} \frac{Z(\beta')}{a_3}) (1 + k_x \frac{Z(\beta')}{a_3}) (1 + k_{xy} \frac{Z(\beta')}{a_3})}} \quad (7.18)$$

$$B(\beta) = \frac{Y(\beta')}{a_2 \sqrt{\cos^2(k_f \frac{p_i}{2} \frac{Z(\beta')}{a_3}) (1 + k_x \frac{Z(\beta')}{a_3}) (1 + k_{xy} \frac{Z(\beta')}{a_3})}} \quad (7.19)$$

Zgoraj opisani enačbi nato odvajamo po vseh parametrih množice β in tako dobimo Jacobijevo matriko J_A . Primer parcialnega odvoda po parametru k_{xy} vidimo v enačbi 7.20. S pomočjo delnih vektorjev, kot je $J_A = \frac{\partial B(\dots)}{\partial k_{xy}}$, sestavimo končni vektor gradientov J .

$$\frac{\partial B(\beta)}{\partial k_{xy}} = - \frac{Y(\beta') Z(\beta')}{a_2 a_3 (1 + k_{xy} \frac{Z(\beta')}{a_3})^2 (1 + k_y \frac{Z(\beta')}{a_3}) \sqrt{\cos^2(k_f \frac{p_i}{2} \frac{Z(\beta')}{a_3})}} \quad (7.20)$$

Algoritem za rekonstrukcijo superelipsoidov, podrobneje opisan v [30], na podlagi točk in začetne ocene izračuna parametre superelipsoida:

Vhodni podatki:

seznam n 3D točk x_1, \dots, x_n ;

začetni parametri Λ_0 ;

funkcija ujemanja R ;

$\text{Err}_0 = 0$;

za $j = 1$ do n

$\text{Err}_0 = \text{Err}_0 + R^2(x_j, \Lambda_0)$;

$k = 0$;

ponovi

Izračunaj Λ_{k+1} z metodo Levenberg–Marquardt;

$\text{Err}_{k+1} = 0$;

za $j = 1$ do n :

$\text{Err}_{k+1} = \text{Err}_{k+1} + (\sqrt{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3} F^{\epsilon_1}(x_j, \Lambda_{k+1}) - 1)^2$;

ce $\text{Err}_{k-1} < \text{Err}_k + \text{Poisson sum}$

Vrni Λ_{k+1} ;

sicer

$\text{Err}_k = \text{Err}_{k+1}$

$k = k + 1$;

dokler je Err_k dovolj majhen

ali pa je razlika $\text{Err}_k - \text{Err}_{k-1}$ zanemarljiva

Izhod: Λ

Za rast posameznih superelipsoidov nato postopoma dodajamo več točk, dokler skupna napaka, definirana kot razdalja vsake točke do površine superelipsoida, ne preseže v programu nastavljenе napake. Določeni parametri so omejeni na določen interval (parameter šiljenja k je omejen na interval $[-1, 1]$), zato moramo morebitne presežene vrednosti tudi pravilno preslikati. Pri šiljenju se vsaka vrednost nad 1 preslika na 1, vsaka vrednost pod

-1 pa na -1.

7.4 Iskanje podobnih superelipsoidov

Kadar vemo, da imajo opazovane najdbe podobne ali skoraj enake dimenzije, lahko predpostavimo, da so parametri velikosti in oblike $a_1, a_2, a_3, \epsilon_1, \epsilon_2$ enaki. Tako mora metoda rekonstrukcije poiskati le pozicijske in orientacijske parametre superelipsoida na novih regijah. Težava je le v izbiri točk v regiji superelipsoida, saj so parametri preračunani za specifično regijo, nove regije pa imajo drugačne točke, ki tudi po obliki niso nujno podobne prvotni regiji.

Nov postopek rekonstrukcije:

1. izberemo območje, kjer je najenostavneje rekonstruirati superelipsoid in izračunamo vse njegove parametre,
2. po 3D modelu naključno porazdelimo nova semena s fiksnimi parametri $a_1, a_2, a_3, \epsilon_1$ in ϵ_2 , število točk v regiji superelipsoida pa povečamo,
3. poženemo postopek rekonstrukcije tako, da iščemo le pozicijske in orientacijske parametre.

Težave z regijami točk lahko omilimo z večanjem števila točk v semenih in s sprotnim večanjem dovoljene skupne napake ter razdalje med točkami v regiji in površino superelipsoida.

Poglavje 8

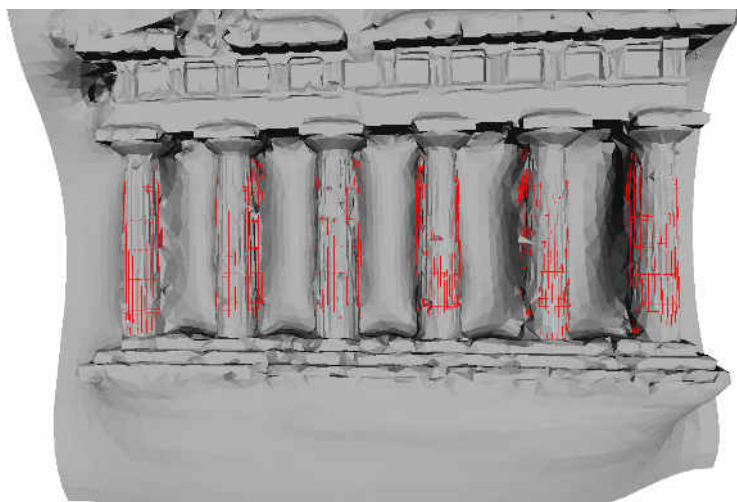
Rezultati

V nadaljevanju povzemamo rezultate rekonstrukcije superelipsoidov iz 3D modelov, opisanih v poglavju 7.2.

8.1 Stebri templja Neptun

Po izvirnem modelu templja Neptun smo po vseh stebrih hkrati posadili 35 semen, ki smo jih nato gradili v 50 korakih gradnje. Za maksimalno dovoljeno razdaljo med superelipsoidom in točkam v regiji smo določili 5,0, za maksimalno napako pa 6,0. Končen rezultat je 12 ustreznih superelipsoidov, ki jih lahko vidimo na sliki 8.1. Najmanjša napaka v regijah s povprečno 264 točkami je 0,90, največja pa 1,14.

Čeprav so končne napake skoraj 6-krat manjše od dovoljene maksimalne napake, bi ob manjši maksimalni dobili le en ustrezen superelipsoid tretjega stebra. Upoštevati moramo, da med gradnjo napaka neenakomerno raste in pada, še posebej pri izvirnih modelih, kjer popolnoma pravilnih potencialnih superelipsoidov ni.



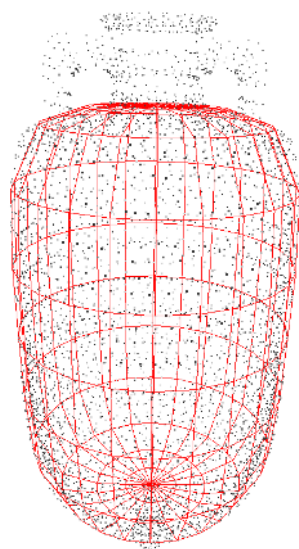
Slika 8.1: Hkrati rekonstruirani superelipsoidi, ki modelirajo stebre templja, prikazani v izvornem modelu Neptun.

8.2 Telesa antičnih amfor

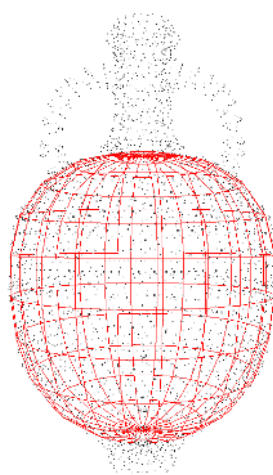
Z modeli antičnih amfor smo želeli preizkusiti rekonstrukcijo deformiranih superelipsoidov z dodatnimi parametri simetričnega šiljenja K_{xy} in valovanja s frekvenco K_f . Na spletu smo izbrali 3D modele štirih čimbolj različnih amfor, med katerimi je bila ena rekonstruirana s pomočjo fotogrametrije, ostale tri pa so rekonstruirali na podlagi ročno narisanih arheoloških skic. Cilj rekonstrukcije je bil zajeti zunanji rob telesa amfore, na ročaje, ного in vrat pa se nismo osredotočali. Maksimalna dovoljena razdalja pri rekonstrukciji je 1,0, maksimalna napaka pa 2,0. Rezultat rekonstrukcije vidimo na sliki 8.2.

Vrednosti parametrov K_{xy} deformiranih superelipsoidov se gibajo med 0 in 0,4 in najbolj vplivajo na obliko. Vrednosti K_f se najbolj izrazi le pri superelipsoidu amfore G199, in sicer na vrednost 0,10.

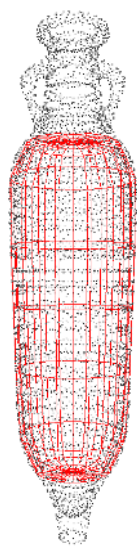
Na sliki 8.2a lahko vidimo tudi pomanjkljivosti pri izrisovanju superelipsoidov, saj glede na majhno napako 0,21 krivulja ne bi smela tako izrazito zapustiti roba amfore.



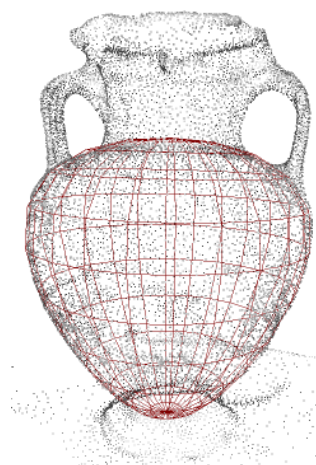
(a) Agora G199



(b) Agora M54B



(c) Africana 3A



(d) NCMA

Slika 8.2: Rezultati rekonstrukcije teles antičnih amfor z deformiranimi superelipsoidi

8.2.1 Preizkus vpliva števila točk na kakovost rezultata

Skupno št. točk	a_1	a_1	a_1	ϵ_1	ϵ_1	k_{xy}	N	err
5973	10,99	10,99	30,53	0,32	1,00	0,11	2054	0,11
2996	10,99	10,99	30,31	0,31	1,00	0,11	1047	0,11
755	10,16	10,17	29,15	0,32	1,00	0,12	232	0,11

Tabela 8.1: Parametri najbolj ustreznega superelipsoida, velikost regije N in napaka err v izvornih modelih amfore Africane.

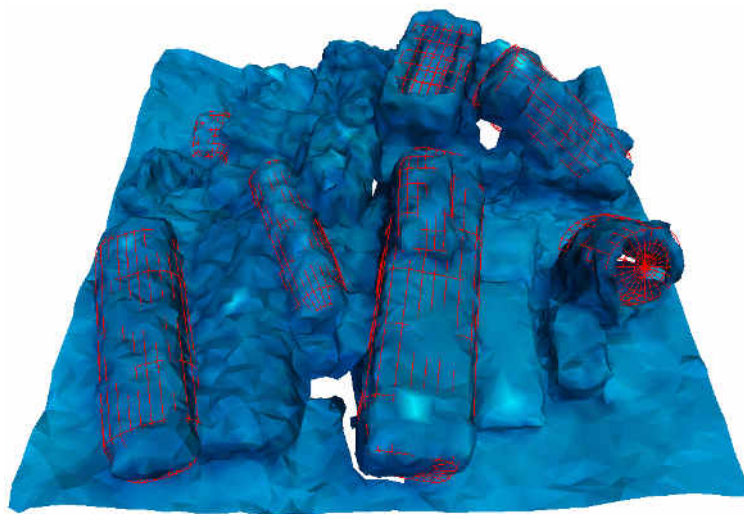
Naša predpostavka je, da skupna gostota točk ne vpliva drastično na kakovost rezultata, dokler s postopkom poenostavitve ne pokvarimo izrazitih morfoloških značilnosti predmeta. Vsa reduciranja smo izvajali postopoma tako, da smo skupno število trikotnikov v vsakem koraku razpolovili, dokler nismo dobili modela v rangi velikosti 5 do 10 tisoč trikotnikov, morfologija pa je ostala približno enaka.

Predpostavko smo preverili na modelu Africana 3A, ki poleg zunanjega roba, ki smo ga želeli rekonstruirati, vsebuje tudi notranji rob. V tabeli 8.1 vidimo, da med modeloma s približno 6000 točkami in 3000 točkami ni bistvenih razlik v parametrih superelipsoida in končni napaki. Model s 755 točkami pa je zreduciran do te mere, da algoritem ni razločil med notranjim in zunanjim robom, zato se je ujel v notranjega in ni več rasel.

Rekonstrukcijo smo v vseh modelih ponovili z enako maksimalno razdaljo 1,0 in maksimalno napako 2,0, število korakov gradnje in velikost začetnega semena pa smo prilagajali velikosti izvirnega modela. Ob morebitni drugačni maksimalni razdalji in napaki bi lahko dobili približno enak končen model kljub le 755 točkam.

8.3 Primerjava z izmerjenimi dimenzijami

Model Sutivan smo s Segmentorjem v preteklosti že rekonstruirali [28]. Iz osnovnega modela smo izločili vse potencialne kandidate superelipsoidov in



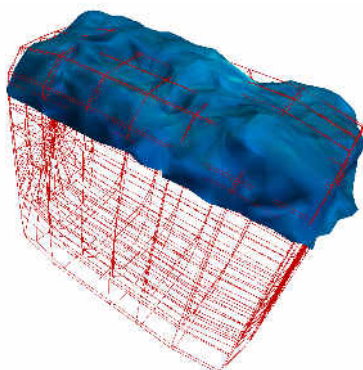
Slika 8.3: Rekonstruirani superelipsoidi, prikazani po izvornem modelu Suti-
van.

iz njih pripravili globinske slike iz najustreznejših zornih kotov. Rezultate rekonstrukcije smo primerjali z ročno izmerjenimi dolžinami na izvornem modelu.

V magistrskem delu smo postopek rekonstrukcije ponovili z MeshSegmentorjem, rezultati pa so povzeti v tabelah 8.2 in 8.3. Za maksimalno razdaljo smo izbrali vrednost 6,0, za maksimalno napako pa 10,0.

Zaradi okolja Meshlab in podpore za obdelavo trikotniških mrež nam ni bilo potrebno pripravljati globinskih slik posameznih predmetov, rezultate pa smo lahko uvozili v izvorni model brez priprave podpornih skript, ki smo jih morali pripraviti za program Segmentor. Izvorni model z rekonstruiranimi superelipsoidi vidimo na sliki 8.3.

Rezultati imajo podobno povprečno napako po širini in nekoliko izboljšano napako po dolžini, občutno slabši pa so rezultati po višini superelipsoida. Največjo napako lahko pripišemo predmetoma št. 5 in št. 6, kjer so superelipsoidi izrazito zrasli v prazen prostor (slika 8.4), vendar je prednost MeshSegmentorja ravno v tem, da lahko takšne anomalije dovolj hitro opazimo, tako pa lahko prilagodimo maksimalno razdaljo in maksimalno napako



Slika 8.4: Potencialna težava superelipsoidov je rast v prazen prostor.

potrebam modela. Večja odstopanja superelipsoidov od dejanskega modela lahko pripišemo slabi celotni natančnosti modela in neenakomernim grobim površinam na posameznih predmetih. Opisane anomalije že odpravljamo pri iskanju parametrov tako, da funkcijo ujemanja množimo s približkom volumna $V = a_1 a_2 a_3$, vendar se model superelipsoida lahko kljub popravkom pri specifičnih oblikah objektov še vedno razteguje v prazen prostor.

Najdba	Mertive na modelu			Dimenzije superelipsoida		
	širina	višina	dolžina	višina	širina	dolžina
3	95,05	201,62	40,71	96,02	185,45	43,60
5	107,50	205,80	47,39	105,33	210,67	79,24
6	52,86	115,81	21,63	57,91	118,89	75,15
8	57,43	213,89	42,86	55,80	220,40	56,89
9	81,98	273,02	56,42	85,98	277,37	64,65
11	44,21	77,26	28,31	48,91	77,19	41,28
13	95,12	351,22	54,78	99,06	360,28	73,37
Povprečna napaka				2,82	5,78	17,84
Standardni odklon				1,86	5,01	17,40

Tabela 8.2: Dimenzije kvadrastih predmetov modela Sutivan.

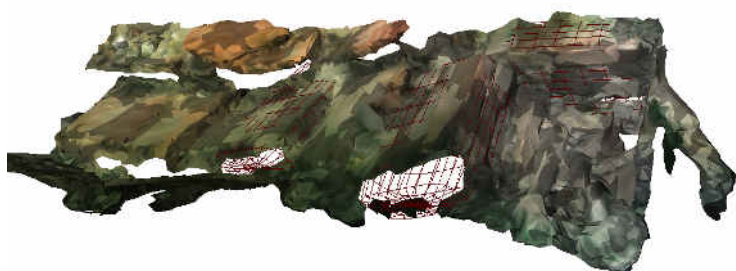
Najdba	Meritve na modelu		Dimenzije superelipsoida	
	radij	dolžina	radij	dolžina
10	43,92	97,80	41,81	98,45
Napaka			2,11	0,66

Tabela 8.3: Dimenzije kamnitega dolija modela Sutivan.

8.4 Primer iskanja podobnih oblik

Za iskanje podobnih oblik smo izbrali model Kupa, saj ga sestavlja kopica približno enakih zidakov. Izbrali smo si najbolj očiten zidak in pognali postopek rekonstrukcije z razdaljo 0,4 in napako 0,7 pri semenih velikosti 16 točk. Parametre oblike dobljenega superkvadraka ($a_1 = 1,45$, $a_2 = 3,12$, $a_3 = 4,24$, $\epsilon_1 = 0,17$ in $\epsilon_2 = 0,33$) smo fiksirali za iskanje. Maksimalno razdaljo smo povečali na 0,5, maksimalno napako na 1,0, velikost semen pa smo povečali s 16 na 100. Semena smo posadili po celotnem modelu, po procesu rekonstrukcije pa je nastalo 36 superelipsoidov. Odstranili smo vse nepravilne, končen rezultat pa so 3 superelipsoidi (slika 8.5).

Zaradi slabšega rezultata smo v drugem poskusu označili, kje želimo posaditi semena. Tem smo zmanjšali število točk na 20 in ponovno pognali postopek. Nastali so 3 superelipsoidi (slika 8.6) iz najbolj očitnih delov zidakov, ostalih pa z algoritem nismo našli. Zaradi sprotnega prilagajanja napak in iskanja najboljšega števila točk v začetnih semenih postopek iskanja ni bil občutno hitrejši, kot če bi rekonstruirali celoten 3D model brez fiksiranja parametrov oblike.



Slika 8.5: Rekonstruirani superelipsoidi na modelu Kupa po nenadzorovanem primitivnem iskanju.



Slika 8.6: Rekonstruirani superelipsoidi na modelu Kupa po nadzorovanem primitivnem iskanju.

Poglavje 9

Sklepne ugotovitve

V okviru magistrskega dela smo preizkusili metodologijo zajema, obdelave, segmentacije in rekonstrukcije prostora. Fotografirali smo tempelj Neptun in s pomočjo odprtokodnega orodja za fotogrametrijo MicMac pridobili oblak točk in trikotniško mrežo, na podlagi katere smo nato segmentirali in rekonstruirali superelipsoide stebrov templja. Za druge testne primere smo pridobili že narejene 3D modele, sestavljene iz oblakov 3D točk.

Posodobili smo program Segmentor za segmentacijo s superelipsoidi, ga vključili v odprotokodno orodje Meshlab ter razvili nadzorovano metodo sejnanja semen za segmentacijo in lastno metodo deformacije superelipsoida, primerno za modeliranje amfor. S to metodo smo nato rekonstruirali številne druge superelipsoide iz 3D modelov podvodnih najdišč in amfor, ki smo jih prenesli s spleta. Tako smo potrdili, da metodologija deluje na podatkih, ki so nastali z različnimi tehnikami zajema ali pa v okolju, kjer so operativni posegi omejeni in zahtevni, rezultati pa nepopolni in manj natančni.

Primitivno metodo iskanja podobnih superelipsoidov bi lahko posodobili, da bi znala oceniti minimalno število potrebnih točk za identifikacijo podobnega superelipsoida, dovoljeno napako pa bi morala znati postopno zmanjševati. Tako bi v začetnih korakih superelipsoide lahko poljubno premikala in obračala po 3D modelu, kasneje pa bi pri iskanju najboljšega nepravilnosti strogo zavračala.

Definirana deformacija superelipsoidov se zaradi periodičnosti sinusoidne funkcije potencialno lahko ujame v lokalne optimume. To lahko preprečimo z omejevanjem funkcije na manjši interval, lahko pa bi preizkusili tudi kakšno drugo metodo iskanja parametrov, ki bi bila za ustavljanje v lokalnih optimumih manj dovzetna.

S segmentacijo in rekonstrukcijo prostora na podlagi volumetričnih modelov pa smo pridobili možnost parametrizacije opazovanih objektov. Z običajnimi superelipsoidi lahko tako nek objekt predstavimo s 5 parametri oblike, deformiran superelipsoid pa s 7 parametri. Obdelali bi lahko večjo količino 3D modelov amfor in na podlagi enostavnega razvrščanja preverili, če se dobljene skupine ujemajo s arheološko klasifikacijo. Če se, bi lahko v nadaljevanju pripravili učni algoritem, ki bi zajete najdbe lahko avtomatsko uvrščal v uveljavljene kategorizacijske skupine.

Avtor magistrerja se s širšo problematiko 3D dokumentiranja kulturne dediščine ukvarja od leta 2012, ko je iz te problematike že diplomiral [65]. Skupaj s sodelavci Laboratorija za računalniški vid na FRI in Zavoda za varstvo kulturne dediščine Slovenije pa je o tej problematiki objavil tri konferenčne prispevke [15, 66, 67] in članek v mednarodni reviji s faktorjem vpliva [28].

Literatura

- [1] A. Bandiera, C. Alfonso, R. Auriemma, in M. Di Bartolo. Monitoring and conservation of archaeological wooden elements from ship wrecks using 3D digital imaging. V *Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, 2013, zvezek 1, strani 113–118, oktober 2013.
- [2] Stephane Bazeille, Isabelle Quidu, Luc Jaulin, in Jean-Philippe Malkasse. Automatic underwater image pre-processing. V *CMM'06*, 2006.
- [3] G. Bianco, A. Gallo, F. Bruno, in M. Muzzupappa. A comparison between active and passive techniques for underwater 3D applications. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3816:357–363, 2011.
- [4] F Bruno, G Bianco, M Muzzupappa, S Barone, in AV Razionale. Experimentation of structured light and stereo vision for underwater 3D reconstruction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(4):508–518, 2011.
- [5] M. Lo Brutto in Paola Meli. Computer vision tools for 3D modelling in archaeology. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 1:1–6, 2012.
- [6] C.E. Catalano, M. Mortara, M. Spagnuolo, in B. Falcidieno. Semantics and 3D media: Current issues and perspectives. *Computers & Graphics*, 35(4):869–877, 2011.

- [7] M. Chaumont, L. Tribouillard, G. Subsol, F. Courtade, J. Pasquet, in M. Derras. Automatic localization of tombs in aerial imagery: Application to the digital archiving of cemetery heritage. V *Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, 2013, zvezek 1, strani 657–660, oktober 2013.
- [8] Paolo Cignoni, Marco Callieri, Massimiliano Corsini, Matteo Dellepiane, Fabio Ganovelli, in Guido Ranzuglia. Meshlab: an open-source mesh processing tool. V *Eurographics Italian Chapter Conference*, zvezek 2008, strani 129–136, 2008.
- [9] Jeroen De Reu, Philippe De Smedt, Davy Herremans, Marc Van Meirvenne, Pieter Laloo, in Wim De Clercq. On introducing an image-based 3D reconstruction method in archaeological excavation practice. *Journal of Archaeological Science*, 41:251–262, 2014.
- [10] Jeroen De Reu, Gertjan Plets, Geert Verhoeven, Philippe De Smedt, Machteld Bats, Bart Cherretté, Wouter De Maeyer, Jasper Deconynck, Davy Herremans, Pieter Laloo, in others. Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage. *Journal of Archaeological Science*, 40(2):1108–1121, 2013.
- [11] Dnevnik.hr. Senzacionalno otkriće u Kupi: pronađen 2000 godina star rimski brod. Dosegljivo: <http://dnevnik.hr/vijesti/hrvatska/senzacionalno-otkrice-u-kupi-pronadjem-2000-godina-star-rimski-brod---412092.html>. [Dostopano: 15.07.2016].
- [12] P. Drap, D. Merad, J. Seinturier, A. Mahiddine, D. Peloso, J.-M. Boi, L. Long, B. Chemisky, in J. Garrabou. Underwater programmetry for archaeology and marine biology: 40 years of experience in Marseille, France. V *Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, 2013, zvezek 1, strani 97–104, oktober 2013.
- [13] P. Drap, J. Seinturier, D. Scaradozzi, P. Gambogi, L. Long, in F. Gauch. Photogrammetry for virtual exploration of underwater archeological si-

- tes. V *Proceedings of the 21st International Symposium, CIPA 2007: AntiCIPAting the Future of the Cultural Past: Athens (Greece), 01–06 October 2007*, 2007.
- [14] Miran Erič. New reflections on the protection of world heritage in the future: Global symbolic meaning of autochthonous and indigenous origins of water navigation. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 3(4):597–612, 2014.
- [15] Miran Erič, Franc Solina, Marko Perkovič, Darja Grosman, in Žiga Stopinšek. Zajem in obdelava 3D podatkov v podvodni arheologiji, 1. del. 2013.
- [16] M. Erič, R. Kovačič, G. Berginc, M. Pugelj, Žiga Stopinšek, in F. Solina. The impact of the latest 3D technologies on the documentation of underwater heritage sites. V *Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, 2013, zvezek 2, strani 281–288, oktober 2013.
- [17] Miran Erič, Andrej Gaspari, Katarina Čufar, Franc Solina, in Tomaž Verbič. Zgodnjerimska ladja iz Ljubljanice pri Sinji Gorici = early roman barge from the Ljubljanica River at Sinja Gorica. *Arheološki vestnik*, 65:187–254, 2014.
- [18] Valentina Filova, Franc Solina, in Jadran Lenarčič. Automatic reconstruction of 3D human arm motion from a monocular image sequence. *Machine Vision and Applications*, 10(5-6):223–231, 1998.
- [19] Thomas Funkhouser, Patrick Min, Michael Kazhdan, Joyce Chen, Alex Halderman, David Dobkin, in David Jacobs. A search engine for 3D models. *ACM Trans. Graph.*, 22(1):83–105, 2003.
- [20] Andrej Gaspari in Miran Erič. Minimalni standardi podvodnih arheoloških raziskav: izhodišča in smernice. Projektna študija, 2010.

- [21] Ayelet Gilboa, Ayellet Tal, Ilan Shimshoni, in Michael Kolomenkin. Computer-based, automatic recording and illustration of complex archaeological artifacts. *Journal of Archaeological Science*, 40(2):1329–1339, 2013.
- [22] Leore Grosman, Oded Smikt, in Uzy Smilansky. On the application of 3-D scanning technology for the documentation and typology of lithic artifacts. *Journal of Archaeological Science*, 35(12):3101–3110, 2008.
- [23] Pierre Grussenmeyer, Emmanuel Alby, Pierre Assali, Valentin Poitevin, Jean-François Hullo, in Eddie Smigiel. Accurate documentation in cultural heritage by merging tils and high-resolution photogrammetric data. V *SPIE Optical Metrology*, strani 808508–808508. International Society for Optics and Photonics, 2011.
- [24] Sven Havemann in Dieter W. Fellner. Seven research challenges of generalized 3D documents. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 27(3):70–76, 2007.
- [25] Peter Holt. An assessment of quality in underwater archaeological surveys using tape measurements. *International Journal of Nautical Archaeology*, 32(2):246–251, 2003.
- [26] Qi-Xing Huang, Simon Flöry, Natasha Gelfand, Michael Hofer, in Helmut Pottmann. Reassembling fractured objects by geometric matching. V *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, zvezek 25, strani 569–578. ACM, 2006.
- [27] Kashif Iqbal, Rosalina Abdul Salam, Mohd Osman, Abdullah Zawawi Talib, in others. Underwater image enhancement using an integrated colour model. *IAENG International Journal of Computer Science*, 32(2):239–244, 2007.
- [28] Aleš Jaklič, Miran Erič, Igor Mihajlović, Žiga Stopinšek, in Franc Solina. Volumetric models from 3D point clouds: The case study of sarcophagi

- cargo from a 2nd/3rd century AD Roman shipwreck near Sutivan on island Brač, Croatia. *Journal of Archaeological Science*, 62(10):143–152, 2015.
- [29] Aleš Jaklič, Aleš Leonardis, in Franc Solina. Segmentor: An object-oriented framework for image segmentation. 1996.
- [30] Aleš Jaklič, Aleš Leonardis, in Franc Solina. *Segmentation and recovery of superquadrics*. Springer, 2000.
- [31] Robin Kalia, Keun-Dong Lee, BVR Samir, Sung-Kwan Je, in Weon-Geun Oh. An analysis of the effect of different image preprocessing techniques on the performance of surf: Speeded up robust features. V *Frontiers of computer vision (FCV), 2011 17th Korea-Japan joint workshop*, strani 1–6. IEEE, 2011.
- [32] Avshalom Karasik in Uzy Smilansky. 3D scanning technology as a standard archaeological tool for pottery analysis: practice and theory. *Journal of Archaeological Science*, 35(5):1148–1168, 2008.
- [33] Anestis Koutsoudis, Blaž Vidmar, George Ioannakis, Fotis Arnaoutoglou, George Pavlidis, in Christodoulos Chamzas. Multi-image 3D reconstruction data evaluation. *Journal of Cultural Heritage*, 15(1):73–79, 2014.
- [34] Bojan Kverh, Aleš Jaklič, Aleš Leonardis, in Franc Solina. Using recover-and-select paradigm on triangulated data. Tehnično poročilo, FRI, UL, 1997.
- [35] E. Leclercq, M. Savonnet, A. Troya-Galvis, in S. Buttner. Investigating a multi-paradigm system for the management of archaeological data: Corpus lapidum burgundiae. V *Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, 2013, zvezek 1, strani 679–682, oktober 2013.

-
- [36] Sylvain Lefebvre, Samuel Hornus, in Sabrice Neyret. Octree textures on the GPU. Dosegljivo: http://http.developer.nvidia.com/GPUGems2/gpugems2_chapter37.html. [Dostopano: 25.05.2016].
- [37] Aleš Leonardis, Aleš Jaklič, in Franc Solina. Superquadrics for segmenting and modeling range data. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 19(11):1289–1295, 1997.
- [38] Kenneth Levenberg. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Quarterly of applied mathematics*, 2(2):164–168, 1944.
- [39] JunJie Liu, Anthony Jakas, Ala Al-Obaidi, in Yonghuai Liu. Practical issues and development of underwater 3D laser scanners. V *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2010 IEEE Conference on*, strani 1–8. IEEE, 2010.
- [40] Min Lu, Yujin Zhang, Bo Zheng, T. Masuda, S. Ono, T. Oishi, K. Sengoku-Haga, in K. Ikeuchi. Portrait sculptures of augustus: Categorization via local shape comparison. V *Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage), 2013*, zvezek 1, strani 661–664, oktober 2013.
- [41] A. Mahiddine, J. Seinturier, D.P.J. Boi, P. Drap, D. Merad, in Luc Long. Underwater image preprocessing for automated photogrammetry in high turbidity water: An application on the Arles-Rhone XIII roman wreck in the Rhodano river, France. V *Virtual Systems and Multimedia (VSMM), 2012 18th International Conference on*, strani 189–194, september 2012.
- [42] Donald W Marquardt. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2):431–441, 1963.

-
- [43] N. A. Matthews in T. Noble. Aerial and close-range photogrammetric technology: providing resource documentation, interpretation, and preservation. *Technical Note*, 428:42, 2008.
- [44] John McCarthy in Jonathan Benjamin. Multi-image photogrammetry for underwater archaeological site recording: An accessible, diver-based approach. *Journal of Maritime Archaeology*, 9(1):95–114, 2014.
- [45] Igor Mihajlović. Antique shipwreck with sarcophagi near Sutivan on the island of Brač. *Histria antiqua*, 21(21):649–655, 2012.
- [46] Thomas B. Moeslund, Adrian Hilton, in Volker Krüger. A survey of advances in vision-based human motion capture and analysis. *Computer vision and image understanding*, 104(2):90–126, 2006.
- [47] J. Angás Pajas in A. Serreta Oliván. Assessment, dissemination and standardization of geometric data recording of Archaeological Heritage obtained from 3D laser scanning. V *Actes du Colloque Virtual Retrospect*, strani 187–193, 2009.
- [48] Hanspeter Pfister, Matthias Zwicker, Jeroen Van Baar, in Markus Gross. Surfels: Surface elements as rendering primitives. V *Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, strani 335–342. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 2000.
- [49] Pravilnik o arheoloških raziskavah. Uradni list RS, št. 3/2013, 2013.
- [50] William H Press. *Numerical recipes 3rd edition: The art of scientific computing*. Cambridge university press, 2007.
- [51] Fabio Remondino. Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. *Remote Sensing*, 3(6):1104–1138, 2011.
- [52] Fabio Remondino in Stefano Campana. 3D recording and modelling in archaeology and cultural heritage. *BAR International Series*, 2598, 2014.

- [53] Alessandro Rizzi, Carlo Gatta, in Daniele Marini. From retinex to automatic color equalization: issues in developing a new algorithm for unsupervised color equalization. *Journal of Electronic Imaging*, 13(1):75–84, 2004.
- [54] Chris Roman, Gabrielle Inglis, in James Rutter. Application of structured light imaging for high resolution mapping of underwater archaeological sites. V *OCEANS 2010 IEEE-Sydney*, strani 1–9. IEEE, 2010.
- [55] Idit Saragusti, Avshalom Karasik, Ilan Sharon, in Uzy Smilansky. Quantitative analysis of shape attributes based on contours and section profiles in artifact analysis. *Journal of Archaeological Science*, 32(6):841–853, 2005.
- [56] Philip J Schneider. Nurb curves: a guide for the uninitiated. *Develop, The Apple Technical Journal*, 1996.
- [57] Roberto Scopigno, Marco Callieri, Paolo Cignoni, Massimiliano Corsini, Matteo Dellepiane, Federico Ponchio, in Guido Ranzuglia. 3D models for cultural heritage: Beyond plain visualization. *Computer*, 44(7):48–55, 2011.
- [58] Thomas W. Sederberg, Jianmin Zheng, Almaz Bakenov, in Ahmad Nasri. T-splines and T-NURCCs. V *ACM transactions on graphics (TOG)*, zvezek 22, strani 477–484. ACM, 2003.
- [59] Julien Seinturier, Christophe Riedinger, Amine Mahiddine, Daniela Peloso, Jean-Marc Boï, Djamel Merad, in Pierre Drap. Towards a 3D based platform for cultural heritage site survey and virtual exploration. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1(2):573–578, 2013.
- [60] Ariel Shamir. A survey on mesh segmentation techniques. V *Computer graphics forum*, zvezek 27, strani 1539–1556. Wiley Online Library, 2008.

-
- [61] Linda Shapiro in George C. Stockman. *Computer vision*. Prentice Hall, 2001.
- [62] D. Skarlatos, S. Demestiha, in S. Kiparissi. An "open" method for 3D modelling and mapping in underwater archaeological sites. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 1(1):1–24, 2012.
- [63] Franc Solina. Računalniški vid nekdanj in danes. V *Računalniška obdelava slik in njena uporaba v Sloveniji ROSUS 2006*. Univerza v Ljubljani, 2006.
- [64] Franc Solina. New media art projects, panoramic images and live video as interface between real and virtual worlds. *DESIDOC Journal of Library & Information Technology*, 34(2):110–124, 2014.
- [65] Žiga Stopinšek. Uporabnost 3D merilnikov v kulturni dediščini. Diplomsko naloga, Fakulteta za računalništvo in informatiko, Univerza v Ljubljani, 2012.
- [66] Žiga Stopinšek, Gregor Berginc, Miran Erič, in Franc Solina. Uvajanje 3D tehnologij pri varstvu kulturne dediščine. V *ROSUS 2013 : računalniška obdelava slik in njena uporaba v Sloveniji 2013 : zbornik 8. strokovne konference, Maribor, 21. marec 2013*, strani 89–97, Maribor, 2013.
- [67] Žiga Stopinšek, Lara Prusnik, Gorazd Rajar, Gregor Berginc, Luka Šajn, Miran Erič, in Franc Solina. Fotogrametrično zajemanje 3D podatkov. V *Triindvajseta elektrotehniška in računalniška konferenca ERK 2014*, stran 219, Portorož, 2014.
- [68] Žiga Stopinšek, Simon Žagar, Lado Langof, in Jan Češnja. Raa3D. Dostopno: <https://github.com/ddksr/Raa3D>. [Dostopano: 11.07.2016].
- [69] Richard Szeliski. *Computer vision: algorithms and applications*. Springer Science & Business Media, 2010.

- [70] Richard Szeliski in David Tonnesen. *Surface modeling with oriented particle systems*, zvezek 26. ACM, 1992.
- [71] William Tasman in Edward A. Jaeger. *Duane's Ophthalmology 2009 Edition*. Philadelphia. Lippincott Williams & Wilkins, 2008.
- [72] The University of Washington, School of Forest & Environmental Sciences. Raster Analysis I. Dosegljivo: https://courses.washington.edu/gis250/lessons/raster_analysis1/. [Dostopano: 20.05.2016].
- [73] Corey Toler-Franklin, Benedict Brown, Tim Weyrich, Thomas Funkhouser, in Szymon Rusinkiewicz. Multi-feature matching of fresco fragments. *ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH Asia)*, 29(6), december 2010.
- [74] Joe Warren in Henrik Weimer. *Subdivision methods for geometric design: A constructive approach*. Morgan Kaufmann, 2001.
- [75] Wikipedia. Amfora. Dosegljivo: <https://en.wikipedia.org/wiki/Amphora>. [Dostopano: 25.06.2016].
- [76] Wikipedia. Subdivision surface. Dosegljivo: https://en.wikipedia.org/wiki/Subdivision_surface. [Dostopano: 10.04.2016].
- [77] Christian Wöhler. *3D computer vision: efficient methods and applications*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [78] Atsushi Yamashita, Ryosuke Kawanishi, Tadashi Koketsu, Toru Kaneko, in Hajime Asama. Underwater sensing with omni-directional stereo camera. V *Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), 2011 IEEE International Conference on*, strani 304–311. IEEE, 2011.